

*Редакционный совет:*

**Голенков В.А.** д-р техн. наук,  
проф., председатель  
**Радченко С.Ю.** д-р техн. наук,  
проф., зам. председателя  
**Борзенков М.И.** канд. техн. наук, доц.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук,  
проф.

*Главный редактор серии:*

**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук,  
проф., заслуж. деятель науки  
Российской Федерации

*Заместители*

*главного редактора серии:*  
**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

*Редколлегия:*

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф.,  
член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчиных В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук,  
проф., академик РАН  
**Корндорф С.Ф.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф.,  
академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

*Ответственный за выпуск:*

**Григорьева О.Ю.**

*Адрес редколлегии серии:*

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21  
www.ostu.ru  
E-mail: nmu@ostu.ru

Зарег. в Министерстве Российской  
Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств  
массовой информации.  
Свидетельство: ПИ № 77-15496  
от 20 мая 2003 года

Подписной индекс **29504**  
по объединенному каталогу «Пресса  
России»

© ОрелГТУ, 2009

### Содержание

#### Механика

<i>Гордон В.А., Малинин В.Г., Мулюкин О.П., Лаврусь О.Е., Финогенова С.А. Текущее состояние разработки и классифицирования предохранительной и редуцирующей пневмогидроарматуры с исполнительными органами из упругопористого материала МР.....</i>	3
<i>Гордон В.А., Ушаков Л.С., Борзенков М.И., Мулюкин О.П., Лаврусь О.Е., Финогенова С.А. Новые конструкции рычажно-грузовых предохранительных клапанов с переставляемой осью вращения двуплечего рычага.....</i>	11
<i>Ешуткин Д.Н., Котылев Ю.Е., Грядунова Е.Н., Журавлева А.В., Талалаев Д.И. О потерях энергии в сливном трубопроводе гидравлических машин ударного действия.....</i>	16
<i>Фоминова О.В., Чернышев В.И. Управление изгибными колебаниями стержня посредством опорного момента.....</i>	23
<i>Рустамов Б.Э. Взаимодействие трещиновидных полостей в горящем твердом топливе, на границе которого заданы условия первой основной задачи.....</i>	28

#### Физика

<i>Савков С.А., Тюлькина Е.Ю. О вычислении потока тепла между коаксиальными цилиндрами в разреженном молекулярном газе.....</i>	35
<i>Варгашкин В.Я. Косвенные измерения дипольного момента наблюдаемой части вселенной....</i>	41
<i>Рогожина Т.С. Эффекты энергообмена при рекомбинации атомов на поверхности твердого тела...</i>	47
<i>Фроленкова Л.Ю. Инженерные методы определения адгезионной прочности соединения твердых тел.</i>	53

#### Технологии, инструменты и моделирование технологических процессов

<i>Белкин Е.А. Стохастический характер геометрической модели микрорельефа.....</i>	61
<i>Винокурова И.М., Смоленцев В.П. Определение оптимальных режимов при электрохимической размерной обработке титана и его сплавов с учетом особенностей теплопереноса.....</i>	67
<i>Хромов В.Н., Коренев В.Н., Барабаш В.В. Сравнительная оценка свойств газопламенных покрытий полученных при напылении порошковыми материалами водородно-кислородным пламенем.....</i>	74

#### Оборудование, технологическая оснастка и основы конструирования

<i>Ванин В.С., Фоминова О.В., Данилов В.А. Исследование влияния допущения о точечном контакте колеса машины с поверхностью микропрофиля при оценке вибрации рабочего места оператора.....</i>	79
<i>Пахолкин Е.В., Кузьмичев Д.А. Теоретический анализ механизмов формирования смазывающих свойств масел с позиции их проявления в виде явлений электрической природы.....</i>	83

#### Приборостроение и системы управления

<i>Подмастерьев К.В., Петрова О.С. Экспериментальные исследования эффективности устройства контроля и регулирования температуры в помещении.....</i>	91
<i>Давыдова Н.В., Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И. Выбор оптимального значения добавочного сопротивления при измерении параметра двухполюсника методом двух вольтметров.....</i>	99
<i>Пилипенко О.В., Демина Ю.А., Демина Е.Г., Демин А.В. Автоматизированная система контроля манометрических терморегуляторов на основе термoeлектрических модулей пельтье.....</i>	102
<i>Плотников С.Н. Измерение интегральных характеристик строительных конструкций на основе вибрационного метода.....</i>	109

#### Испытания, контроль, диагностика, мониторинг

<i>Пахолкин Е.В., Мишин В.В. Методические аспекты исследования несущей способности смазочного слоя крупногабаритных опор жидкостного трения.....</i>	113
<i>Прохоров В.В., Волков Б.И., Шкатов П.Н. Исследование возможности выявления трещин под стеллитовыми защитными пластинами в лопатках паровых турбин вихретоковым методом.....</i>	121

*Editorial council:*

**Golenkov V.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof., president*

**Radchenko S.Y.** *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*

**Borzenkov M.I.** *Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.*

**Kolchunov V.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Popova L.V.** *Doc. Sc. Ec., Prof.*

**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Konstantinov I.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

*Editor-in-chief*

**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., honored worker of science of Russian Federation*

*Editor-in-chief Assistants:*

**Gordon V.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Kirichek A.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Podmasterjev K.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

*Editorial Committee*

**Babichev A.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Vdovin S.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Dmitriev A.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*

**Emelyanov S.G.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Zubarev Y.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Subchaninov V.G.** *Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.*

**Ivanov B.R.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Kolesnikov K.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

**Korndorf S.F.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Malinin V.G.** *Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.*

**Osadchy V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Panin V.E.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

**Raspopov V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Smolenzev V.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

*Responsible for edition:*

**Grigorieva O.Yu.**

*Address*

302020 Orel,

Naugorskoye Chaussee, 29

(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,

41-98-21

[www.ostu.ru](http://www.ostu.ru)

E-mail: [nmu@ostu.ru](mailto:nmu@ostu.ru)

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-15496 from 20.05.03

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossii**» 29504

© OSTU, 2009

## Contents

### Mechanics

- Gordon V.A., Malinin V.G., Mulyukin O.P., Lavrus O.E., Finigenova S.A.* Current state in development and classification of safety and reducing pneumatic-hydro-armature with functional actuating units made of elasto-porous material..... 3
- Gordon V.A., Ushakov L.S., Borzyonkov M.I., Mulyukin O.P., Lavrus O.E., Finigenova S.A.* New designs of ball-pressing safety valves with rearrangeable rotation axis of double-armed lever..... 11
- Eshutkin D.N., Kotylev Yu.E., Gryadunova E.N., Zuravleva A.V., Talalaev D.I.* Energy losses in return piping of hydrohammer..... 16
- Fominova O.V., Chernishev V.I.* The controlling of the deflecting oscillation of the bar by means of the supporting moment..... 23
- Rustamov B. E.* Interaction cracked of cavities in burning firm fuel on which border conditions of the first basic boundary value problem..... 28

### Physics

- Savkov S.A., Tyulkina E.Yu.* Calculation of the heat transfer between coaxial cylinders in a rarefied molecular gas..... 35
- Vargashkin V.J.* Indirect measurements of dipole moment of the observable part of the universe..... 41
- Rogozhina T.S.* Effects of an exchange of energy at connection of atoms..... 47
- Frolenkova L.Yu.* Engineering methods of definition of adhesion strength of solid connection..... 53

### Technologies, tools and engineering process modeling

- Belkin E.A.* Stochastic geometrical model formed micro relief..... 61
- Vinokarova I.M., Smolontsev V.P.* Optimum performance definition during electrochemical dimensional working titan and its alloys taking into account peculiarities of heat-mass transmission..... 67
- Chromov V. N., Korenev V. N., Barabash V. V.* Comparative estimation of properties of flame coatings received at spraying powder materials a hydrogen-oxygen flame..... 74

### Equipment, production tools and design fundamentals

- Vanin V.S., Fominova O.V., Danilova V.A.* Research of assumption effect on point contact of machine wheel with microprofile surface at evaluation of operator's workplace oscillation..... 79
- Pakholkina E.V., Kuzmichev D.A.* The theoretical analysis of gears of formation of greasing properties of oils from the position of their display in the form of the phenomena of the electric nature..... 83

### Instrument Engineering

- Podmasterjev K.V., Petrova O.S.* Experimental researches of efficiency of the device of the control and regulation of temperature in a room..... 91
- Davidova N.V., Korndorf S.F., Nogachova T.I.* Choice of optimum value of additional resistance at measurement of parametre of a two-pole by a method of two voltmeters..... 99
- Pilipenko O.V., Demina Y.A., Demina E.G., Demin A.V.* The automated monitoring system of manometrical temperature regulators on the basis of thermoelectric modules pelte..... 102
- Plotnikov S. N.* Integrated characteristics measurement of building constructions using vibration method. 109

### Tests, control, diagnostics, monitoring

- Pakholkina E.V., Mishin V.V.* Methodical aspects of probe of bearing ability of the lubricant layer of large-sized bearing parts of the liquid friction..... 113
- Prokhorov V.V., Volkov B.I., Shkatov P.N.* Research of an opportunity of revealing of cracks under stellite protective plates in blades steam turbines eddy current testing..... 121

УДК 620.179.111

В.А. ГОРДОН, В.Г. МАЛИНИН, О.П. МУЛЮКИН,  
О.Е. ЛАВРУСЬ, С.А. ФИНОГЕНОВ**ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И КЛАССИФИЦИРОВАНИЯ  
ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ И РЕДУЦИРУЮЩЕЙ  
ПНЕВМОГИДРОАРМАТУРЫ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ  
ОРГАНАМИ ИЗ УПРУГОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА МР**

*Охарактеризованы текущее состояние разработки предохранительной и редуцирующей пневмогидроарматуры с исполнительными органами из материала МР и предложена их классификационная схема с учетом авторских разработок арматуры данного класса*

*Are characterized a current condition of development of safety and reducing pneumohydroarmature with agencies from material MR and their classification scheme in view of author's development of armature of the given class is offered*

Использование упругопористых нетканых металлических материалов (УНММ) в качестве элементов и рабочих органов машин и оборудования обеспечивает существенное снижение металлоемкости последних, внедрение в производство экологически чистых безотходных (ресурсосберегающих) технологий изготовления деталей при одновременном повышении срока их службы и эксплуатационной надежности в составе машин и оборудования.

Ярким представителем материалов данного класса является упругопористый материал МР из витой металлической проволоки, разработанный в СГАУ в 60-ые годы прошлого века для нужд аэрокосмической техники и позднее нашедший применение в других отраслях отечественной промышленности, включая производство пневмогидроарматуры в клапанном агрегатостроении.

При этом в /1: ч.1, с. 8-11/ отмечается, что в последние годы прогрессирует направление разработки патентоспособных конструкций на базе материала МР, относящихся к области уплотнительной техники применительно к запорной, предохранительной и регулирующей (редуцирующей) пневмогидроарматуре.

Однако, на настоящий момент даже в фундаментальных трудах и справочных изданиях отсутствуют классификационные схемы указанных типов пневмогидроарматуры с исполнительными органами из материала МР, подкрепленные конкретными примерами их конструкторской реализации. Вышеизложенное вносит определенный дисбаланс в стройную систему знаний по конструированию новых типов арматуры с элементами из УНММ для пневмогидросистем транспортной техники и наземных пневмогидротопливных комплексов заправки мобильных транспортных средств.

В связи с этим на базе систематизации известных и авторских разработок пневмогидроарматуры с исполнительными органами из УНММ разработана их классификационная схема, представленная на рисунке 1 и содержащая сведения о литературных источниках по примерам их конкретного исполнения.

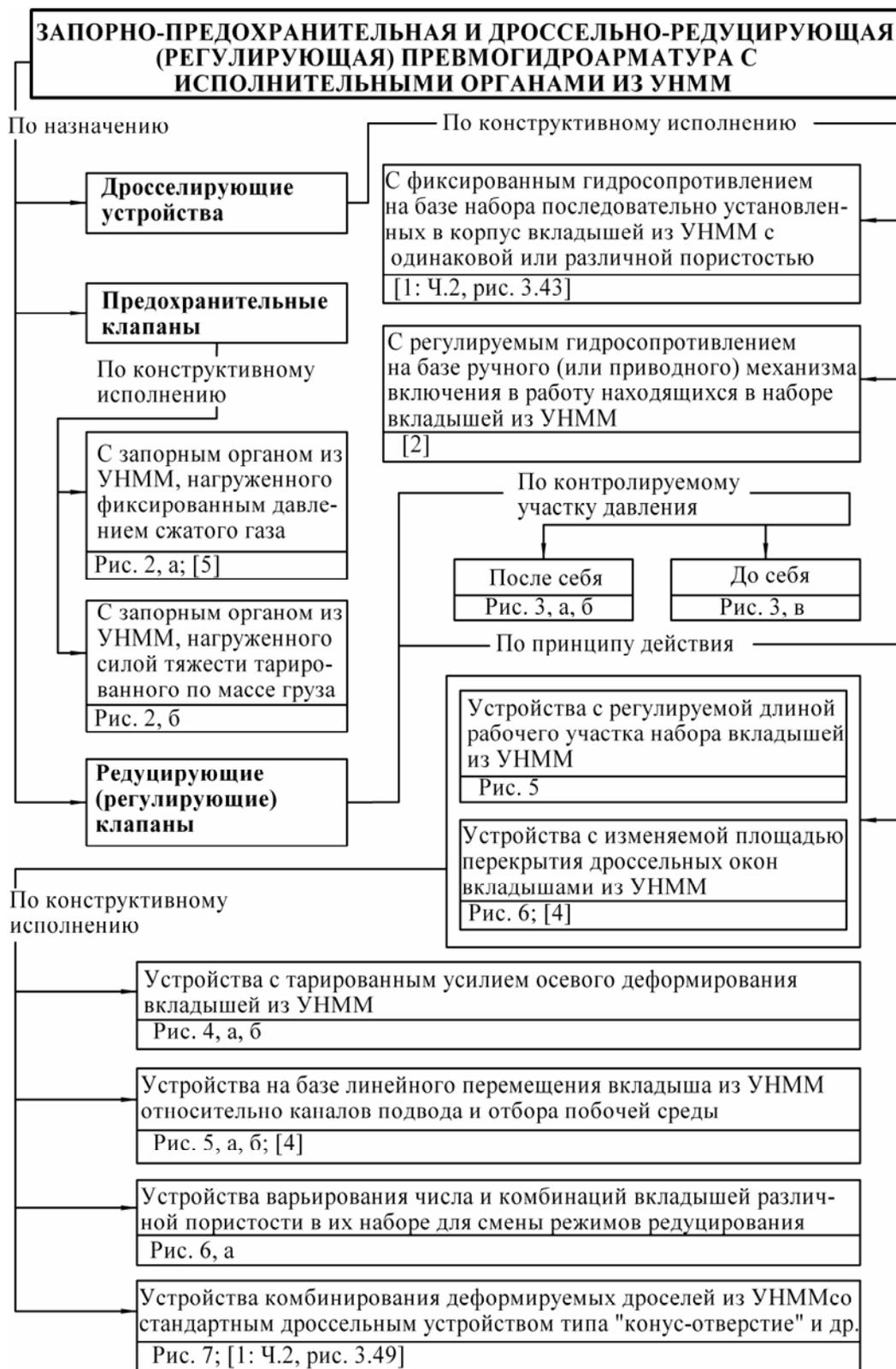


Рисунок 1 – Классификационная схема запорно-предохранительной и дросельно-редуцирующей (регулирующей) пневмогидроарматуры с исполнительными органами из УНММ

В соответствии с классификационной схемой пневмогидроарматура с элементами из УНММ по назначению подразделяется на три группы: дроссельные устройства, предохранительные клапаны и редуцирующие (регулирующие) клапаны.

Целесообразность применения дросселирующих устройств на базе сменных вкладышей из материала МР предопределяется:

– уникальным свойством таких вкладышей изменять свою пропускную способность (пропускаемый расход среды) при их осевом сжатии при помощи резьбовых пар для получения требуемого расхода проходящей через них рабочей среды;

– высокой активной пористостью материала МР (все поры материала являются сообщающимися, что повышает стойкость таких дросселирующих устройств в сопоставлении с дросселями с отверстиями малого диаметра).

Типовой вариант конструктивного исполнения предохранительного клапана (ПК) с запорным органом из УНММ представлен на рисунке 2, а.

Указанный ПК содержит корпус 1, внутри которого между уплотненным поршнем 2 и герметично установленным в корпусе 1 резьбовым подпятником 4 размещен запорный орган 3 из УНММ. Поршень 2 нагружен расчетным (фиксированным) давлением сжатого газа, подводимого от автономного источника питания. Это обеспечивает поджатие («закрытие») пор и капилляров запорного органа 3, и давление от защищаемого сосуда с избыточным давлением газа в «Дренаж» устройства не поступает. При росте избыточного давления газа до заданной (расчетной) величины происходит снижение усилия поршня 2, нагружающего запорный орган 3, при этом поры и капилляры последнего «раскрываются» и газ дренируется в каналы «Дренаж».

При отсутствии в пневмогидросистеме автономного источника сжатого газа конструкция на рисунке 2, а может быть трансформирована в конструкцию ПК с поджатием запорного органа из УНММ усилием тарированного по массе груза (рисунок 2, б).

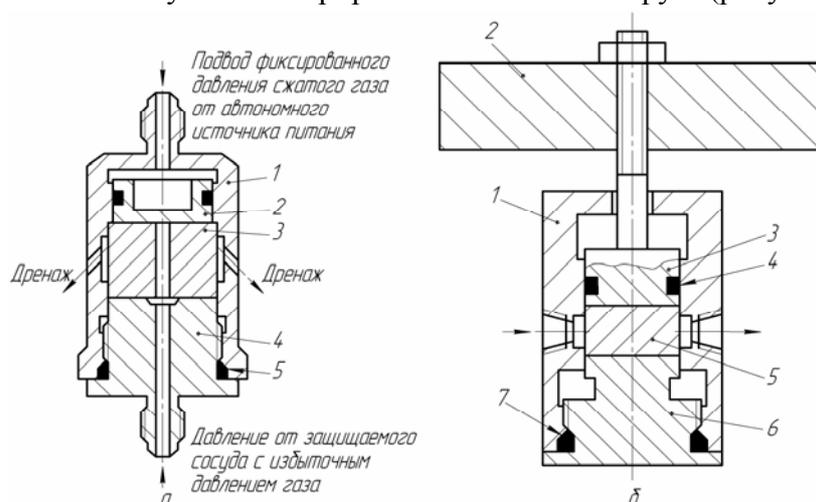


Рисунок 2 – Предохранительный клапан с пневматическим (а) и грузовым (б) задатчиками нагрузки

- а: 1 – корпус; 2 – уплотненный поршень; 3 – втулочный запорный орган из УНММ; 4 – резьбовой подпятник; 5 – уплотнение  
 б: 1 – корпус; 2 – груз, тарированный по массе; 3 – поршень; 4, 7 – уплотнение; 5 – цилиндр из УНММ; 6 – резьбовой подпятник

Эксплуатируемая в настоящее время клапанно-редуцирующая (регулируемая) пневмогидроарматура на базе пружинных клапанно-седельных пар также не всегда удовлетворяет требованиям практики в силу ряда присущих ей недостатков:

– большие рабочие хода чувствительных и чувствительных элементов, обуславливающих большую инерционность подвижных звеньев (неудовлетворительное быстроедействие) и невысокую чувствительность устройств такого рода;

– значительные габариты и масса конструкций ввиду общепринятого принципа последовательного размещения в корпусе пружины, чувствительного и исполнительного органов;

– повышенная склонность к автоколебаниям и пульсациям при регулировании выходного параметра (расхода или давления) вследствие наличия в арматуре упругоподвешенных масс чувствительно-регулирующего органа, перемещающихся в

условиях нестабильного характера сил трения по направляющим поверхностям корпусной арматуры, усугубляющего процессами износа контактируемых поверхностей арматуры.

Известны также конструкции арматуры такого рода, чувствительные и исполнительные органы которых выполнены из упругих оболочечных элементов (эластомерные или металлические мембраны). Однако применение эластомерных мембран ограничивается невысоким температурным диапазоном эксплуатации эластомерных оболочек ( $\pm 60^\circ \text{C}$ , при кратковременном воздействии температур – не свыше  $\pm 80^\circ \text{C}$ ). Данное обстоятельство исключает использование таких оболочек в высокотемпературных (свыше  $+100^\circ \text{C}$ ) и криогенных (ниже  $-120^\circ \text{C}$ ) устройствах, причем в условиях термоциклирования конструкций ресурс работы оболочек резко снижается ввиду интенсификации процесса «старения» резины (потеря упругих свойств с течением времени). Применение в таких конструкциях вместо эластомерных оболочек металлических упругих герметичных элементов (мембран или сильфонов) также сопряжено с рядом отрицательных моментов [1: ч. 2, с. 57...58]/.

Все это предопределили развертывание работ по созданию новых конструкций редуцирующей и регулирующей пневмогидроарматуры с исполнительными органами из материала МР.

Конструкция ПК на рисунке 2, а послужила базой для разработки редуцирующих клапанов, представленных на рисунке 3.

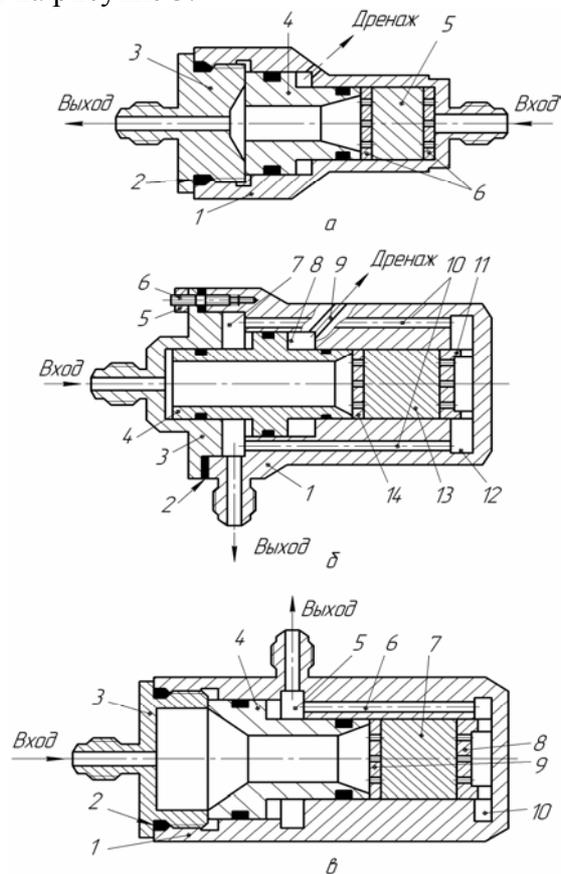


Рисунок 3 – Редуцирующие клапаны «после себя» (а, б) и «до себя» (в)

- а: 1 – корпус; 2 – уплотнение; 3 – резьбовой подпятник;  
 4 – дифференциальный уплотняющий поршень;  
 5 – цилиндр из УНММ; 6 – перфорированный диск; 7 – межпоршневая полость дифпоршня 4
- б: 1 – корпус; 2 – уплотнение; 3 – переходник; 4 – дифференциальный поршень;  
 5 – гайка; 6 – шпилька; 7, 8 – запоршневые полости дифпоршня 4;  
 9 – дренажный канал; 10 – перепускной канал; 11 – перфорированная проставка;  
 12 – выходная полость; 13 – цилиндр из УНММ; 14 – перфорированный диск
- в: 1 – корпус; 2 – уплотнение; 3 – резьбовой подпятник; 4 – дифференциальный уплотняющий поршень;  
 5 – межпоршневая полость дифпоршня 4; 6 – перепускной канал; 7 – цилиндр из УНММ;  
 8 – перфорированный диск; 9 – перфорированная проставка; 10 – выходная полость

Редуцирующий клапан «после себя» (рисунок 3, *а*) включает дифпоршень 4, который «отслеживает» рост или падение давления газа на «Входе» устройства, и, соответственно, снижает или увеличивает степень деформации цилиндра 5 из УНММ для стабилизации величины входного давления газа.

С целью повышения точности редуцирования выходного давления газа редуцирующий клапан «после себя» на рисунке 3, *б* содержит две межпоршневые полости 7 и 8, первая из которых через перепускные каналы 10 сообщается с «Выходом» устройства, а вторая – через канал 9 с окружающей средой. В данном устройстве давление газа со «Входа» устройства воздействует на дифпоршень 4, чем обеспечивается соответствующее поджатие цилиндра 13 и УНММ, и, следовательно, достижение требуемой площади его проходного сечения для получения заданного редуцирующего давления в выходной полости 12. Из выходной полости 12 редуцированное давление газа поступит через «Выход» к потребителю газа. При изменении отбираемого расхода газа со стороны «Выход» (уменьшение или увеличение количества потребителей, подключаемых к раздаточной магистрали за редуцирующим клапаном), соответственно, будет увеличиваться или уменьшаться давление газа в запоршневой полости 7. Это приведет к соответствующему дополнительному сжатию или разгрузке от осевого сжатия цилиндра 13, что обеспечит вновь стабилизацию редуцируемого давления газа на «Выходе» устройства.

В конструкции редуцирующего клапана «до себя» на рисунке 3, *в* выходная полость 10 за цилиндром 7 из УНММ при помощи перепускного канала 6 сообщена с межпоршневой полостью 5 дифпоршня 4, из которой газ поступает на «Выход» устройства к потребителю газа.

На рисунке 4 представлены конструктивные схемы редуцирующих устройств на базе осевого поджатия элемента из материала МР внешней нагрузкой  $F$ .

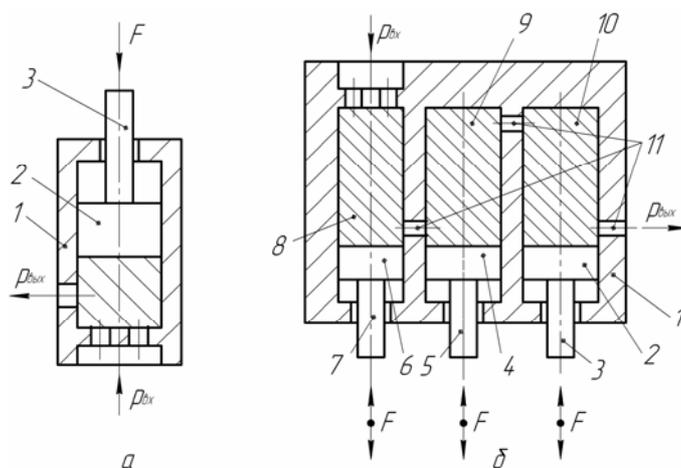


Рисунок 4 – Структурные схемы редуцирующих устройств на основе поджатия одинарного (*а*) и комбинированного (*б*) элементов из материала МР

1 – корпус; 2, 4, 6 – поршень; 3, 5, 7 – шток; 8, 9, 10 – цилиндр из материала МР;  
11 – соединительный канал;  $p_{вх}$ ,  $p_{вых}$  – входное и выходное давления, соответственно

В качестве задатчика нагрузки  $F$  может быть использован резьбовой нагрузочный винт, нагруженный давлением дифференциальный поршень с двухсторонним ходом, электромагнитный клапан или электродвигатель с выходным звеном возвратно-поступательного движения.

Принцип действия конструкции на рисунке 4, *а* основан на использовании материала МР, способного изменять пористость (дросселирующую способность) при упругом деформировании осевой нагрузкой  $F$ . Величина указанной силы не должна превышать 15...20% от усилия прессования образца МР (из условия обеспечения работы материала МР в зоне упругих деформаций).

При комбинировании в устройстве различных по пористости образцов МР при многоступенчатом дросселировании рабочей среды (рисунок 4, б) величина усилия  $F$  для каждого образца должна соответствовать предъявляемому выше условию.

В ряде случаев целесообразно изменение гидросопротивления редуцирующего устройства за счет изменения длины рабочего участка набора цилиндров из материала МР (рисунок 5, а), а также путем дополнительного регулирования площади перекрытия дросселирующих окон (4, 5 или 6) с выходным каналом (рисунок 5, б).

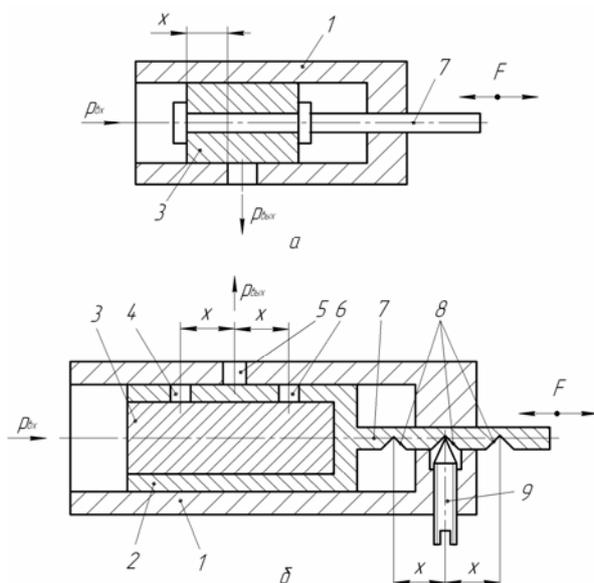


Рисунок 5 – Структурные схемы редуцирующих устройств на базе линейного перемещения детали из материала МР относительно подводящего и отводящего каналов (на рабочем ходе  $x$ )  
 а – штоковый вариант; б – дроссельно-штоковый вариант  
 1 – корпус; 2, 7 – шток; 3 – цилиндр из материала МР; 4, 5, 6 – дроссельное окно; 8 – фиксирующий паз; 9 – фиксирующий резьбовой конус

На рисунке 6 представлен третий тип конструктивных схем дроссельно-редуцирующих устройств на базе комбинирования элементов из материала МР с различной пористостью.

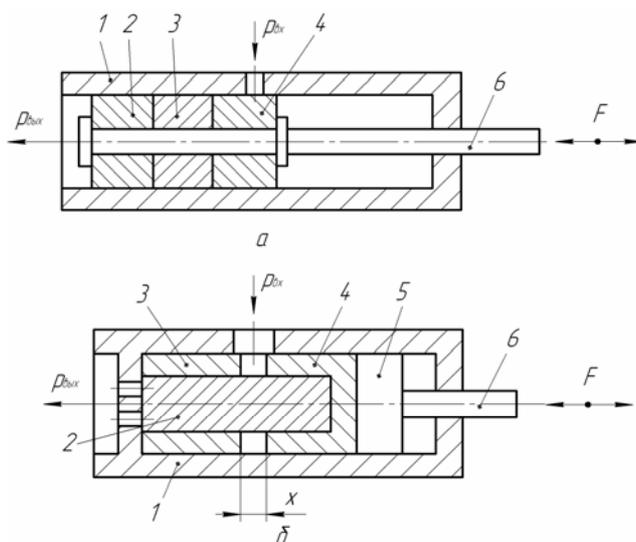


Рисунок 6 – Структурные схемы дроссельно-редуцирующих устройств на базе комбинирования элементов из материала МР с различной пористостью  
 а – конструктивное решение по рисунку 5, а; б – конструктивное решение по рисунку 5, б  
 1 – корпус; 2, 3, 4 – деталь из материала МР; 5 – поршень; 6 – шток

Принцип действия конструкции на рисунке 6, а основан на изменении гидросопротивления элемента МР за счет последовательного ввода одного из звеньев (4, 3, 2) в сопряжение с выходным каналом.

Конструктивное исполнение устройства на рисунке 6, б базируется на изменении гидросопротивления составного элемента за счет перепуска дросселирующей среды через один (2) или через два (3, 4 – 2) элемента МР при варьировании величиной хода  $x$ .

Четвертый тип конструктивных схем дроссельно-редуцирующих устройств на базе элемента МР с встроенной плунжерно-золотниковой парой представлен на рисунке 7.

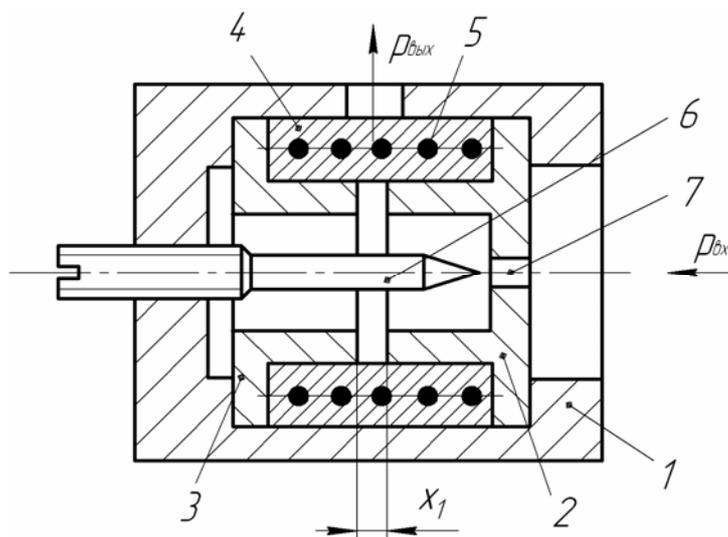


Рисунок 7 – Структурная схема дроссельно-редуцирующего устройства с плунжерно-золотниковой парой из элемента МР (с внутренним армированием цилиндрической пружины сжатия)

- 1 – корпус; 2, 3 – плунжер; 4 – втулка из материала МР с внутренним армированием пружины 5;  
6 – игла дросселя; 7 – проходное сечение дросселя (жиклер);  
 $x_1$  – исходный зазор между торцами плунжеров 2, 3

Конструкция сочетает положительное свойство материала МР изменять расходную характеристику при осевом деформировании под действием среды на плунжер 2 и классический принцип изменения дросселирующего зазора  $x$ , сообщаемого через образец 4 с выходным каналом. Для предварительной настройки конструкции на требуемый расход она снабжена дроссельной иглой 6 с фиксированным положением относительно жиклера 7. Целью внутреннего армирования образцов из МР цилиндрической пружины сжатия является повышение их долговечности (повышение числа рабочих циклов нагружения в эксплуатации без потери упругих свойств). Это подтверждено испытаниями конкретных типов дросселирующих элементов из МР на рабочем продукте АМГ-10 и паровоздушной смеси /6: с. 323...324, рисунок 3.53/.

## ВЫВОДЫ

1. Охарактеризованы текущее состояние разработки предохранительной и редуцирующей (регулирующей) пневмогидроарматуры с исполнительными органами из упругопористого материала МР, включая конструкции таких органов с внутренним армированием цилиндрическими пружинами сжатия.

2. На базе систематизации известных и авторских разработок пневмогидроарматуры такого рода предложена их классификационная схема и конкретные примеры их конструкторского исполнения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Чегодаев, Д.Е. Конструирование рабочих органов машин и оборудования из упругопористого материала МР: Учебно-справочное пособие в двух частях [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, Е.В. Колтыгин. – Самара: НПЦ «Авиатор», 1994. – ч.1 – 156 с.: ил.; ч.2 – 100 с.: ил.
2. Патент 1810704 РФ МКИ<sup>5</sup> F16K 47/14. Дроссель / О.П. Мулюкин, Д.Е. Чегодаев, В.Г. Алмазов и др. // Б.И. – 1993. – №15.
3. А.с. 1717889 СССР МКИ<sup>3</sup> F16K 17/06. Устройство для стабилизации давления среды за насосом / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, А.Г. Муратов и др. // Б.И. – 1993. – №9.
4. Патент 1838703 РФ МКИ<sup>5</sup> F16K 17/06. Клапан / О.П. Мулюкин, Д.Е. Чегодаев, В.Г. А.В. Бугаков и др. // Б.И. – 1993. – №32.
5. Патент 2015528 РФ МКИ<sup>5</sup> G05D 16/10 F16K 17/04. Редуктор / О.П. Мулюкин, Ф.М. Шакиров // Б.И. – 1994. – №12.
6. Чегодаев, Д.Е. Гидропневмотопливные клапанные агрегаты с управляемым качеством динамических процессов: Учебно-справочное пособие [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, А.Н. Кирилин и др.; Под ред. Д.Е. Чегодаева и О.П. Мулюкина. – Самара: СГАУ, 2000. – 546 с.: ил.

**Лаврусь Ольга Евгеньевна**

доцент кафедры «Высшая математика» СамГУПС.  
443086, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18  
Телефон сотовый: 8-927-708-43-10  
E-mail: [om46@mail.ru](mailto:om46@mail.ru)

**Мулюкин Олег Петрович**

заведующий кафедрой «Инженерная графика» СамГУПС, д.т.н., профессор.  
443086, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18  
Телефон: (846) 249-64-73  
E-mail: [om46@mail.ru](mailto:om46@mail.ru)

**Финогенов Сергей Александрович**

заведующий учебной лабораторией кафедры «Инженерная графика» СамГУПС  
443086, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18  
Телефон сотовый: 8-908-387-55-25

**Гордон Владимир Александрович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»  
Тел. (4862) 41-9848  
E-mail: [gordon@ostu.ru](mailto:gordon@ostu.ru)

**Малинин Владислав Георгиевич**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин»  
Тел. (4862) 41-9813  
E-mail: [malinin@ostu.ru](mailto:malinin@ostu.ru)

УДК 629.7.04

В.А. ГОРДОН, Л.С. УШАКОВ, М.И. БОРЗЕНКОВ, О.П. МУЛЮКИН,  
О.Е. ЛАВРУСЬ, С.А. ФИНОГЕНОВ

## НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЫЧАЖНО-ГРУЗОВЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ С ПЕРЕСТАВЛЯЕМОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДВУПЛЕЧЕГО РЫЧАГА

*Охарактеризованы конструктивное исполнение и принцип действия оригинальных конструкций рычажно-грузовых предохранительных клапанов и входящих в их состав разнотипных механизмов перестановки оси вращения двуплечего рычага.*

*The design and principle of action of original designs of lever-cargo safety valves and polytypic mechanisms of rearrangement of an axis of rotation entering into their structure bell-crank are characterized.*

В рамках фундаментально-прикладных исследований ОрелГТУ и СамГУПС в 2007-2008 гг. по повышению функциональной надежности агрегатов защиты и предохранения резервуаров со сжатым газом наземных газозаправочных комплексов мобильной транспортной техники при участии авторов разработано семейство рычажно-грузовых предохранительных клапанов (ПК) с механической (рисунок 1) и автоматической (рисунок 2) перестановкой оси вращения двуплечего рычажно-шарнирного механизма.

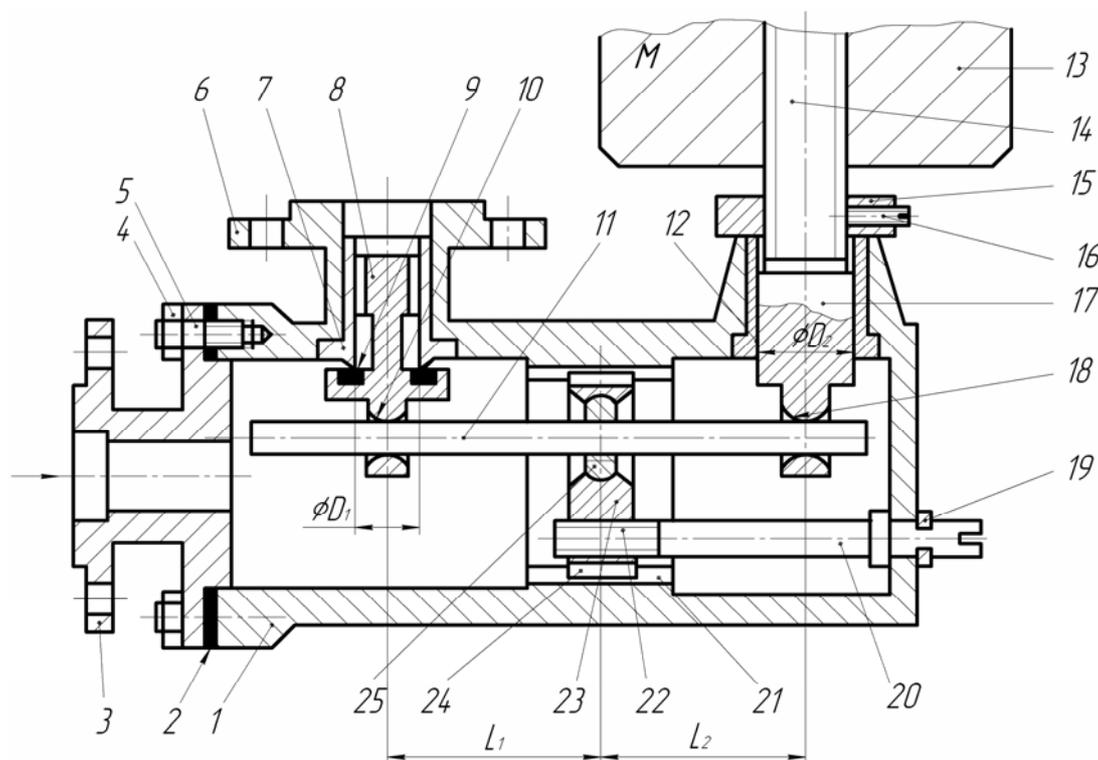


Рисунок 1 – Рычажно-грузовой ПК с механической перестановкой оси вращения двуплечего рычажно-шарнирного механизма

- 1 – корпус; 2 – уплотнительная прокладка; 3 – фланец входной; 4, 15 – гайка; 5 – шпилька;  
6 – фланец выходной; 7 – седло; 8 – запорный орган; 9 – уплотнение;  
10, 18 – сферическое отверстие (шарнир); 11 – двуплечий рычаг; 12 – направляющая;  
13 – груз с тарированной массой  $M$ ; 14, 22 – хвостовик; 16 – резьбовой фиксатор;  
17 – плунжер; 19 – кольцо стопорное; 20 – резьбовой подстроечный орган;  
21 – осевой паз в корпусе 1; 23 – переставляемая опора оси вращения 25 рычага 11.

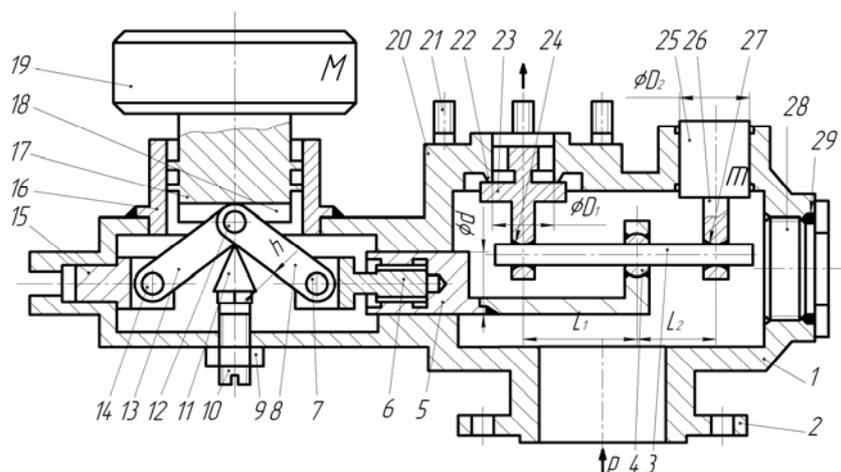


Рисунок 2 – Рычажно-грузовой ПК с автоматическим шатунно-кулисным механизмом перестановки двулучевого рычага

- 1 – корпус; 2 – фланец входной; 3 – рычаг; 4 – ось вращения рычага 3;  
 5 – плунжер; 6 – опора со шлицевой законцовкой; 7, 12, 14 – цилиндрический шарнир;  
 8, 13 – шатун; 9 – гайка; 10 – резьбовой элемент ограничения перемещения деталей 17 и 6;  
 11 – игла; 15 – опора; 16 – переходник; 17 – грузодержатель с радиальным пазом 18 под шатуны 8, 13;  
 19 – груз с тарированной массой; 20 – фланец выходной; 21 – шпилька; 22 – седло;  
 23 – запорный орган; 24, 27 – сферическое отверстие (шарнир);  
 25 – поршень с хвостовиком 26 (массой  $m$ ); 28 – заглушка; 29 – уплотнение

Принцип работы ПК на рисунке 1 заключается в следующем.

Давление  $p$  на входе ПК одновременно воздействует на запорный орган 8, поджимая его по уплотнителю 9 к седлу 7, и на плунжер 17, нагруженный тарированным по массе грузом 13. Запорный орган 8 по сферическому отверстию 10 введен в контакт с левым плечом двулучевого рычага 11, а плунжер 17 по сферическому отверстию 18 введен в контакт с правым плечом рычага 11. В свою очередь сам рычаг подвешен на оси вращения в виде сферической пространственной опоры 25, устанавливаемой в опоре 23.

При давлении  $p \leq p_{\text{дон}}$  (здесь  $p_{\text{дон}}$  – допустимое максимальное давление рабочей среды на входе ПК) с учетом  $\varnothing D_1 < \varnothing D_2$  справедливо неравенство:

$$\left( p_{\text{дон}} \frac{\pi D_1^2}{4} \right) \cdot L_1 + MqL_2 > \left( p_{\text{дон}} \frac{\pi D_2^2}{4} \right) \cdot L_2 \quad (1)$$

и ПК находится в закрытом положении (запорный орган 8 по уплотнителю 9 поджат к седлу 7).

При превышении входного давления  $p$  рабочей среды допустимого давления  $p_{\text{дон}}$  (недопустимое максимальное давление рабочей среды обозначено через  $p_{\text{н.дон}}$ ) в выражении (1) знак неравенства поменяется на противоположный, так как масса груза  $M = \text{const}$ , а с ростом входного давления  $p$  рабочей среды усилие  $p_{\text{н.дон}} \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}$  возрастает в большей

степени, чем усилие  $p_{\text{н.дон}} \cdot \frac{\pi D_1^2}{4}$  в силу  $\varnothing D_1 < \varnothing D_2$ , то есть справедливо:

$$\left( p_{\text{н.дон}} \frac{\pi D_2^2}{4} \right) \cdot L_2 > \left( p_{\text{н.дон}} \frac{\pi D_1^2}{4} \right) \cdot L_1 + MqL_2 \quad (2)$$

В силу (2) запорный орган 8 отойдет от седла 7 и часть избыточного давления рабочей среды сдвинется через выходной фланец 6. При этом со временем на входе ПК вновь установится допустимое давление рабочей среды  $p_{\text{дон}}$  и, в силу неравенства (1) ПК перейдет в закрытое положение в результате посадки запорного органа 8 на седло 7.

С целью упрощения регулирования ПК по давлению срабатывания в данную конструкцию введен механизм перестановки оси вращения 25 рычага 11, выполненный в

виде выведенного из корпуса 1 подстроечного органа 20. Вращение органа 20, в силу осевого движения опоры 23 по пазам 21, 23, обеспечивает перемещение опоры 23, а, следовательно, и оси вращения 25 в требуемое положение при регулировании соотношения плеч рычага 11  $L_1/L_2$ , определяющего давление срабатывания ПК.

При разработке конструкции, представленной на рисунке 2, решалась задача повышения герметизирующей способности клапанно-седельной пары в закрытом положении с одновременным повышением быстродействия срабатывания ПК в сопоставлении с функциональными характеристиками традиционных конструкций рычажно-грузовых ПК [1].

В качестве базовой конструкции ПК на рисунке 2 был принят ПК на рисунке 1, в конструкцию которого с целью достижения вышепоставленной цели вместо устройства механической перестановки оси вращения двуплечего рычага в требуемое (фиксированное) положение относительно его плеч был введен автоматически действующий шатунно-кулисный механизм перестановки оси вращения двуплечего рычага.

Принцип действия данного ПК заключается в следующем.

В исходном положении ПК (давление  $p \leq p_{\text{дон}}$  – см. пояснения к принципу действия конструкции ПК на рисунке 1) требуемое положение оси вращения 4 рычага 3 относительно его плеч  $L_1$  и  $L_2$ , а, следовательно, и положение плунжера 5, в котором установлена указанная ось вращения 4, обеспечивается из соотношения

$$p_{\text{дон}} \frac{\pi d^2}{4} = Mg \quad (3)$$

где  $M$  – масса груза 19;  $d$  – наружный диаметр плунжера 5 (см. рисунок 2);  $g$  – ускорение свободного падения.

Для данного положения ПК справедливо выражение [идентичное ранее рассмотренному неравенству (1) с учетом того, что и в данной конструкции ПК соблюдено  $\varnothing D_1 < \varnothing D_2$ , а масса поршня 25  $m = \text{const}$ ]:

$$\left( p_{\text{н.дон}} \frac{\pi D_2^2}{4} \right) \cdot L_2 > \left( p_{\text{дон}} \frac{\pi D_1^2}{4} \right) \cdot L_1 + Mg L_2 > \left( p_{\text{дон}} \frac{\pi D_2^2}{4} \right) \cdot L_2 \quad (4)$$

и, также как в конструкции на рисунке 1, ПК будет находиться в закрытом положении (запорный орган 23 будет поджат к седлу 22).

При превышении входного давления  $p$  рабочей среды допустимого давления  $p_{\text{дон}}$  (росте до недопустимого значения  $p_{\text{н.дон}}$ ) нарушается равновесие между правым и левым членами равенства (3), которое трансформируется в неравенство:

$$p_{\text{н.дон}} \frac{\pi d^2}{4} = Mg \quad (5)$$

так как  $Mg = \text{const}$ .

В силу неравенства (5) плунжер 5 переместится влево на ход соответствующий ходу  $h$  до контакта шатуна 8 с опорной поверхностью элемента 10.

При перемещении плунжера 5 влево на такой же ход влево переместится установленная в нем опора вращения 4, вследствие чего длина плеча  $L_1$  уменьшится на величину данного перемещения плунжера (обозначим через  $\Delta L$ ), а длина плеча  $L_2$  соответственно увеличится на величину  $\Delta L$ .

С учетом возникшего изменения  $\pm \Delta L$  длин плеч рычага 3 при давлении  $p_{\text{н.дон}}$  в выражении (4) знак неравенства изменится на противоположный:

$$\left( p_{\text{н.дон}} \frac{\pi D_2^2}{4} \right) \cdot (L_2 + \Delta L) > \left( p_{\text{н.дон}} \frac{\pi D_1^2}{4} \right) \cdot (L_1 - \Delta L) + mg L_2 + \Delta L \quad (6)$$

В силу (6) запорный орган 23 отойдет от седла 22 и часть избыточного давления рабочей среды сдренируется через выходной фланец 20. При этом со временем на входе ПК вновь установится допустимое давление рабочей среды  $p_{\text{дон}}$ , при котором неравенство (5)

трансформируется в неравенство (3), а неравенство (6) – в неравенство (4). При этом ПК вновь перейдет в закрытое положение в результате посадки запорного органа 23 на седло 22.

В конструкции на рисунке 2 можно существенно (по сравнению с традиционными конструкциями рычажно-грузовых ПК) повысить герметизирующую способность клапанно-седельной пары 22, 23, так как в данной конструкции масса  $m$  может быть принята достаточно большой для обеспечения требуемой герметичности по ПК, а давление срабатывания клапана и его быстродействие, в основном, определяется конструктивными параметрами самодействующего механизма перестановки оси вращения 4 рычага 3 и скоростью величин  $\pm \Delta L$  к длинам рычага  $L_1$  и  $L_2$ .

В рассматриваемом устройстве использована конструкция самодействующего шатунно-кулисного механизма перестановки оси вращения двулучевого рычага. Конструктивное исполнение механизмов такого рода может быть весьма многообразным и в большинстве случаев определяется общей компоновкой защищаемого объекта (габаритное пространство между отдельными агрегатами ПГС; удобство доступа к регулирующим органам при настройке ПК и проведение с ними профилактических и ремонтных работ и др.), – см. рисунок 3.

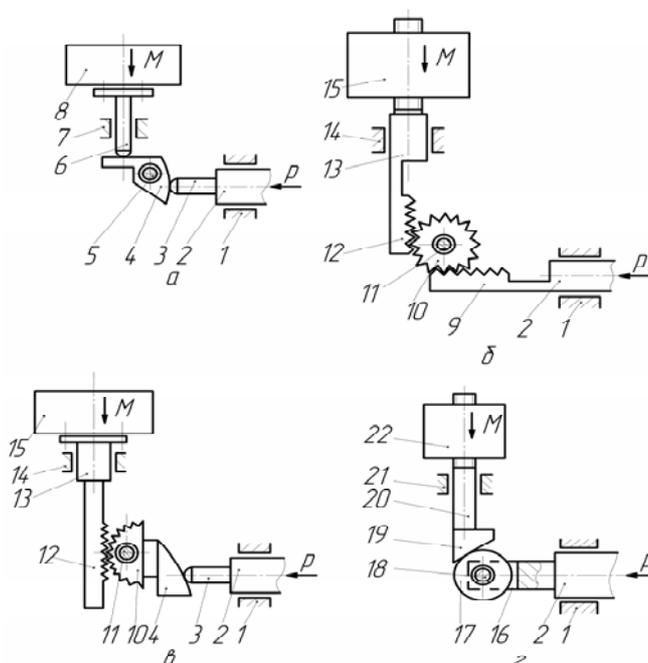


Рисунок 3 – Конструктивные схемы механизмов перестановки оси вращения двулучевого рычажно-шарнирного механизма

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

$a$  – кулачковый;  $b$  – реечно-зубчатый;  $в$  – кулачково-реечно-зубчатый;  $г$  – клиновой с шарнирно подвешенным вращающимся нажимным роликом

1, 7, 14, 21 – направляющая; 2 – плунжер-державка переставляемой оси вращения двулучевого рычага (на рисунке не показан); 3, 6, 13, 20 – шток; 4 – кулачок; 5, 11, 18 – цилиндрический шарнир; 8, 15, 22 – груз с тарированной массой  $M$ ; 9, 12 – зубчато-реечное окончание; 10 – зубчатое колесо (или его фрагмент); 16 – П-образная вилка; 17 – ролик; 19 – конус нажимной

Помимо повышенных герметизирующей способности и быстродействия рычажно-грузовые ПК с автоматически переставляемой осью вращения двулучевого рычага обладают еще двумя уникальными достоинствами:

1. Только ПК такого рода из всей гаммы самых разнообразных по конструкции малоподъемных рычажно-грузовых ПК способны работать в режиме полноподъемных клапанов.

Данное достоинство ПК для ряда ПГС является приоритетным при выборе конкретного типа предохранительного устройства.

2. Наличие в рычажно-грузовых ПК механизма автоматической перестановки оси вращения двуплечего рычага при изменении величины входного давления обеспечивает ПК, включающим такой механизм, возможность работы не только в режиме собственно ПК, но и в режиме регулятора давления. Иными словами, ПК такого рода по своей сути являются предохранительно-регулирующими устройствами. Это существенно расширяет возможности их использования в ПГС малогабаритных объектов, базирующих на использовании универсальных (многофункциональных) ГПТА, сокращающих номенклатуру потребляемых изделий.

Отдельные вопросы конструирования и расчета ПК с механизмами автоматической перестановки оси вращения двуплечего рычага охарактеризованы в /2, 3/.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Левченко, А.С. Текущее состояние разработки и производства беспружинной рычажно-грузовой предохранительно-регулирующей пневмогидроарматуры [Текст] / А.С. Левченко, О.Е. Лаврус, А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин // Вестник транспорта Поволжья – №4. – Самара: СамГУПС, 2008. – с. 27-30.

2. Иванов, Б.Г. Конструкция и расчет рычажно-шарнирных агрегатов систем жизнеобеспечения железнодорожного транспорта: Учебное пособие [Текст] / Б.Г. Иванов, А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин, В.М. Трухман. – Самара: СамГАПС, 2007. – 374 с.: ил.

3. Гордон, В.А.. Регулирующие устройства наддува внутренних полостей роторов: текущее состояние и перспективы развития [Текст] / В.А. Гордон, Л.А. Савин, Г.Ю. Ермоленко и др. // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. – Выпуск 8 (12). – Самара: СамГАПС, 2007. – с. 80-82.

### **Лаврус Ольга Евгеньевна**

Доцент кафедры «Высшая математика» СамГУПС, г. Самара

Телефон сотовый: 8-927-708-43-10

E-mail: [om46@mail.ru](mailto:om46@mail.ru)

### **Мулюкин Олег Петрович**

Заведующий кафедрой «Инженерная графика» СамГУПС, д.т.н., профессор, г. Самара

Телефон: (846) 249-64-73

E-mail: [om46@mail.ru](mailto:om46@mail.ru)

### **Финогенов Сергей Александрович**

заведующий учебной лабораторией кафедры «Инженерная графика» СамГУПС, г. Самара

Телефон сотовый: 8-908-387-55-25

### **Гордон Владимир Александрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»

Тел. (4862) 41-9848

E-mail: [gordon@ostu.ru](mailto:gordon@ostu.ru)

### **Ушаков Леонид Семенович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины»

Тел. (4862) 73-43-51

E-mail: [oushakov2007@mail.ru](mailto:oushakov2007@mail.ru)

### **Борзенков Михаил Иванович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

Тел. (4862) 43-48-90

E-mail: [bim@ostu.ru](mailto:bim@ostu.ru)

Д.Н. ЕШУТКИН, Ю.Е. КОТЫЛЕВ, Е.Н. ГРЯДУНОВА,  
А.В. ЖУРАВЛЕВА, Д.И. ТАЛАЛАЕВ

## О ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ В СЛИВНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

*В статье рассмотрены ударные механизмы семи классов с простым сливным трубопроводом и с трубопроводом с аккумулятором. Приведены расчетные формулы для нахождения относительных инерционных потерь энергии для различных классов ударных механизмов.*

*In article shock mechanisms of seven classes with the simple drain pipeline and with the pipeline with the accumulator are considered. Settlement formulas for a finding of relative inertial losses of energy for various classes of shock mechanisms are resulted.*

В сливной трубопровод из камер ударного механизма периодически, в течение каждого цикла, поступает количество жидкости, равное рабочему объему ударного механизма  $q_0$  (рисунок 1). В ударных механизмах IV, VI [1] классов удаление жидкости происходит в фазе рабочего хода в течение времени  $t_p$  (рисунок 1 а), а в механизмах III, V, VII классов в первой фазе обратного хода в течение времени  $t_1$  (рисунок 1 б). Исключение составляют механизмы I, II классов с двумя управляемыми камерами, а также механизмы, в которых выполняется режим движения с естественным торможением бойка.

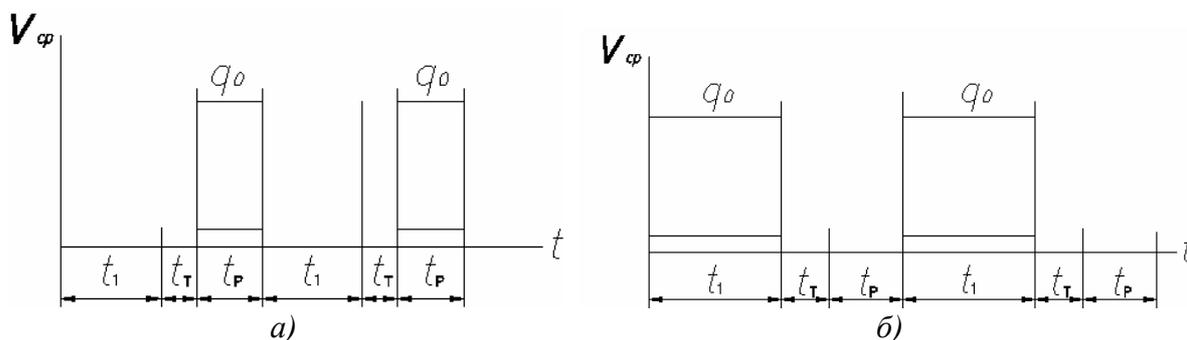


Рисунок 1 – Диаграмма поступления жидкости в сливной трубопровод в ударных механизмах IV, VI а) и III, V, VII классов б)

Рассмотрим случай для механизмов IV, VI классов, когда сливной трубопровод (рисунок 2) является простым с гладкими стенками. Упругие деформации незначительны, и ими можно пренебречь.

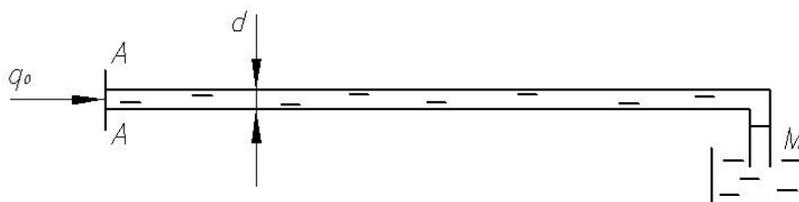


Рисунок 2 – Схема простого сливного трубопровода

При поступлении в сливной трубопровод жидкости объемом  $q$  в движение приводится вся масса  $M_{ж}$  жидкости, находящейся в нем. Потери энергии складываются из двух составляющих: инерционных  $\Delta T_{и}$  и потерь энергии по длине трубопровода  $\Delta T_{тр}$ .

Инерционные потери равны по величине кинетической энергии жидкости в сливном трубопроводе:

$$\Delta T_{и} = \frac{1}{2} M_{ж} V_{ср}^2, \quad (1)$$

где  $M_{ж}$  – масса жидкости, находящейся в трубопроводе;

$V_{ср}$  – средняя скорость жидкости, находящейся в трубопроводе.

Их максимальная величина:

$$\Delta T_{и} = \mu_{ж} M_{б} V^2 / 2 \quad \text{или} \quad \Delta T_{и} = \mu_{ж} T, \quad \mu_{ж} = M_{ж} / M_{б}, \quad (2)$$

где –  $M_{б}$  – масса бойка.

Для определения потерь давления на трение по длине трубопровода воспользуемся формулой Дарси-Вейсбаха [2]:

$$\Delta P_{тр} = \frac{\lambda \gamma L_T}{2d} V_{ср}^2 \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления,

$L_T$  – длина сливного трубопровода,

$d$  – диаметр сливного трубопровода,

$\gamma$  – плотность жидкости.

В ударных механизмах VI класса удаление жидкости из камеры обратного хода в сливной трубопровод происходит при рабочем ходе бойка, поэтому величина скорости жидкости в сливном трубопроводе:

$$V_{ср} = S_{б} V / S_T,$$

где  $S_{б}$  – площадь камеры обратного хода,

$S_T$  – площадь сечения трубопровода,

$V$  – максимальная скорость бойка.

Тогда:

$$\Delta P_{тр} = \frac{\lambda \gamma L_T V^2 S_{б}^2}{2d S_T^2}.$$

Потери энергии в сливном трубопроводе за один цикл движения ударного механизма:

$$\Delta T_{тр} = q \Delta P_{тр}.$$

где  $q$  – рабочий объем камеры обратного хода, т. е. объем жидкости, поступающей и удаляемой в ударный механизм за один цикл движения. В механизмах VI класса  $q = q_0$ .

В первом приближении величину  $q$  можно определить через энергию удара  $T$  и среднее давление жидкости в напорном трубопроводе  $P_{ср}$ :

$$q = T / P_{ср}.$$

С учетом этого потери энергии на трение в сливном трубопроводе:

$$\Delta T_{тр} = \frac{\lambda \gamma L_T V^2 S_{б}^2 T}{2d S_T^2 P_{ср}} \quad (4)$$

Преобразовав формулу (4), окончательно получим:

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{4\lambda \mu_{\text{ж}} T^2}{\pi d^3 P_{\text{ср}}}$$

Таким образом, суммарные потери энергии, связанные с удалением жидкости из ударного механизма в фазе рабочего хода для ударных механизмов VII класса  $\Delta T_{\text{и}} = 0$ , для ударных механизмов VI класса:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{и}} + \Delta T_{\text{тр}} = \mu_{\text{ж}} T \left( 1 + \frac{4\lambda T}{\pi d^3 P_{\text{ср}}} \right).$$

На рисунке 3 приведены зависимости гидравлических  $\Delta T_{\text{тр}}$  потерь энергии от диаметра трубопровода  $d$  и среднего давления жидкости  $P_{\text{ср}}$ . Из графиков следует, что потери энергии из-за сопротивления движению жидкости в сливном трубопроводе существенно уменьшаются при увеличении диаметра сливного трубопровода  $d$  и среднего давления в напорной магистрали  $P_{\text{ср}}$ . Так увеличение диаметра трубопровода от 10 до 30мм, т. е. в 3 раза приводит к снижению потерь энергии с 16; 10; 8; и 6 процентов до 6; 4; 3 и 2 процентов, т. е. в 2,7; 2,5; 2,7 и 2 раза соответственно при среднем давлении в напорном трубопроводе 10; 15; 20 и 25МПа.

Увеличение среднего давления  $P_{\text{ср}}$  от 10 до 25МПа, т. е. в 2,5 раза, приводит к снижению потерь энергии с 16; 5; 2 и 0,6 процентов до 6; 2; 0,8 и 0,2 процентов соответственно при диаметре сливного трубопровода 10; 15; 20 и 30 мм.

Анализ полученных зависимостей, а так же сопоставление формул (2) и (5) показывает, что гидравлические потери (потери по длине трубопровода) существенно ниже (от 5 до 10 раз) инерционных потерь.

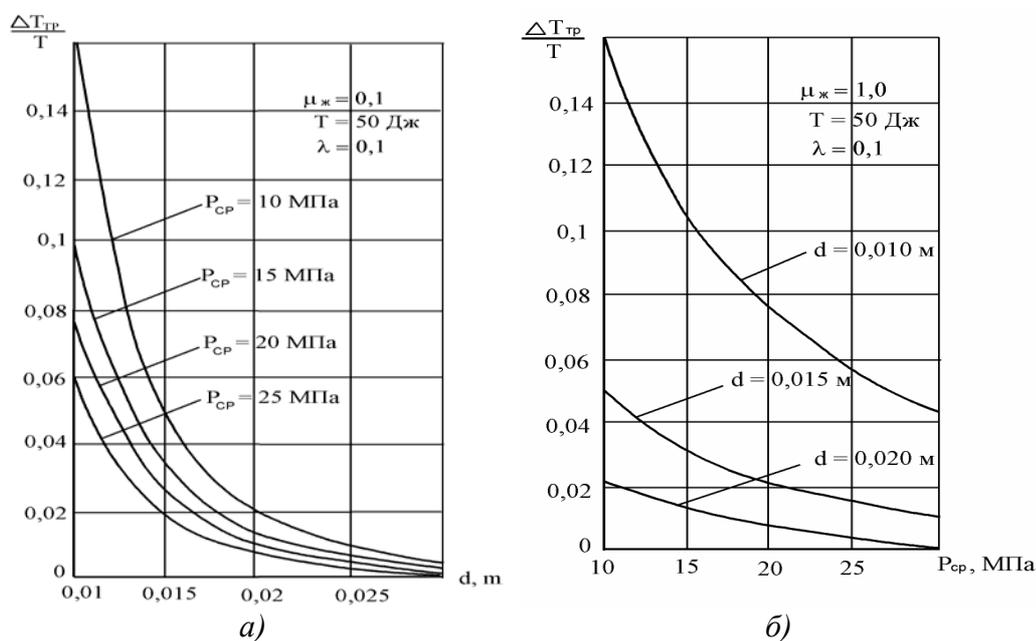


Рисунок 3 – Зависимости гидравлических потерь энергии  $\frac{\Delta T_{\text{тр}}}{T}$

ударных механизмов VI класса

а) от диаметра сливного трубопровода  $d$ ;

б) от среднего давления жидкости в напорной магистрали  $P_{\text{ср}}$ .

Одним из видов гидравлических машин ударного действия являются отбойные молотки, энергия удара которых не более 50Дж, а ударная мощность не более 1кВт [3]. Нами выполнен анализ потерь энергии применительно к этим машинам.

Трубопровод полностью заполнен жидкостью (рисунок 4). Давление жидкости является невысоким и поэтому трубопровод не деформируется.

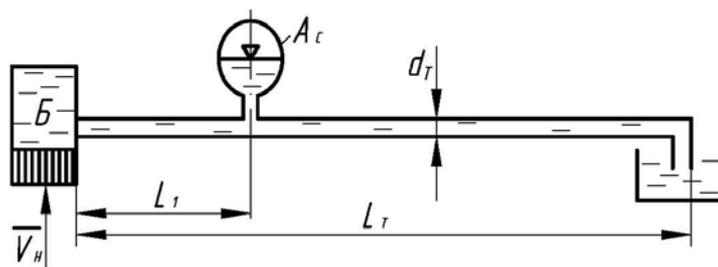


Рисунок 4 – Расчетная схема сливного трубопровода с аккумулятором:

Б – камера ударного механизма; Ас – сливной аккумулятор.

В идеальном случае движение жидкости в сливном трубопроводе происходит с постоянной скоростью в течение всего цикла:

$$V_{cp}^* = \frac{q^*}{t_{ц} S_{Т}},$$

где:  $t_{ц}$  - продолжительность одного цикла движения одного механизма,

$V_{cp}^*$  и  $q^*$  - скорость жидкости и рабочий объем ударного механизма, соответствующие идеальному случаю.

Масса жидкости в сливном трубопроводе:

$$M_{ж} = \gamma L_{Т} S_{Т}.$$

Инерционные потери энергии

$$\Delta T_{и} = \frac{\gamma L_{Т}}{S_{Т}} \frac{N_{уд}^2}{P_{cp}^2},$$

где:  $N_{уд}$  - ударная мощность механизма.

Потери энергии по длине трубопровода, связанные с трением

$$\Delta T_{тр} = 0,44 \lambda \gamma \frac{L_{Т}}{S_{Т}^2 \sqrt{S_{Т}}} \frac{N_{уд}^2}{P_{cp}^3}.$$

Соотношение потерь энергии (инерционные и по длине):

$$\frac{\Delta T_{тр}}{\Delta T_{и}} = 0,88 \frac{\lambda}{S_{Т} \sqrt{S_{Т}}} \lambda.$$

Выполненные нами исследования позволяют утверждать, что для существующих [1] гидравлических отбойных молотков, в диапазоне их энергетических характеристик и параметров трубопроводов, соотношение  $\frac{\Delta T_{тр}}{\Delta T_{и}} \leq 0,1$ , т.е. потери энергии по длине трубопровода не превышает 10 процентов инерционных потерь. Следовательно, основными потерями энергии являются инерционные.

Для сравнительной оценки инерционных потерь различных классов ударных механизмов введем показатель:

$$\tau_{и} = \frac{\Delta T_{и}}{\Delta T_{и}^*},$$

где  $\Delta T_{и}$  - инерционные потери энергии ударного механизма данного класса,

$\Delta T_{и}^*$  - инерционные потери энергии при идеальном случае.

С учетом ранее полученных выражений для  $\Delta T_{и}$  и  $\Delta T_{и}^*$ , после преобразований получим:

$$\tau_{и} = \left( \frac{q}{q^*} \right)^2 * \left( \frac{t_{ц}}{t_{м}} \right)^2,$$

где  $t_{м}$  - продолжительность удаления жидкости из камер механизма в сливной трубопровод.

В монографии Котылева Ю.Е. [1], получена расчетная формула для продолжительности цикла  $t_{ц}$  семи классов ударных механизмов при различных режимах движения.

Из этого же источника можно путем несложных преобразований найти рабочие объемы  $q$  и продолжительность фазы удаления жидкости в сливном трубопроводе.

Полученные нами расчетные формулы для нахождения относительных потерь энергии для различных классов ударных механизмов сведены в таблицу.

Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения потерь энергии в ударных механизмах гидравлических отбойных молотков

Класс ударного механизма	Тип привода, режим движения	Расчетная формула для определения относительных потерь энергии
1	2	3
Ударные механизмы первого класса	Магистральный	$\tau_{и} = \frac{(1 + \rho^2)}{\left[ \sqrt{\rho^3 + \rho^2 + \mu_{ж}} + \rho \sqrt{\rho(1 + \mu_{ж})} \right]^2} \times$ $\times \left[ \rho^3(1 + \mu_{ж}) + \frac{(\rho^2 + \mu_{ж})^2}{(\rho^3 + \rho^2 + \mu_{ж})(1 + \mu_{ж})} \right], \rho < 1.0$ <p>где <math>\rho = S_{Б}/S_{А}</math> – соотношение площадей камер обратного и рабочего хода.</p>
	Автономный. Режим максимальной скорости	$\tau_{и} = \frac{(1 + \rho^2)(a + b + c)^2}{\left[ \frac{\pi^4 [\rho^2 + \mu_{ж}(1 + \rho^2)] [\rho - 2(2\rho - 1)]}{\rho^2 [(1 + \mu_{ж})(1 - 2\rho)]} + \frac{4(1 + \mu_{ж})^2 \rho^2}{[\rho - 2(2\rho - 1)]^2} \right]}$ $a = \frac{\sqrt{[\rho^2 + \mu_{ж}(1 + \rho^2)] [\rho - r(2\rho - 1)]} \pi^2}{\rho \sqrt{(1 + \mu_{ж})(1 - 2\rho)}}, b = \frac{2(1 + \mu_{ж})\rho}{\rho - 2(2\rho - 1)},$ $c = \frac{4\nu}{1 + r}, \nu = \frac{V_0}{V}, r = \frac{P_0}{R},$ <p>где <math>P_0</math> - начальное усилие, <math>R</math> – максимальная сила отдачи, <math>V_0</math> – приведенная к бойку скорость жидкости</p>
Ударные механизмы второго класса	Магистральный привод	$\tau_{и} = \frac{4\rho^2 \left[ (\rho^3 + \rho^2 + \mu_{ж})(1 + \rho^2) \right] \left[ \rho^{3/2} + \sqrt{\rho^3 + \rho^2 + \mu_{ж}(1 + \rho^2)} \right]^2}{\left[ \rho^2 + \mu_{ж}(1 + \rho^2) \right]^2}$

Продолжение таблицы 1		
1	2	3
	Автономный привод. Режим максимальной скорости	$\tau_{и} = \frac{8\rho^7(\rho-r)^2(a_4+b_4+c_4)^2}{\pi^4(1-\rho^2)^2[\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]^2},$ $a = \frac{\pi^2(1-\rho^2)[\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]}{2\rho^2(\rho-r)^2\sqrt{2\rho}}, \quad c = \frac{2\rho}{[\rho-r(2\rho-1)]},$ $b = \frac{2\rho^3(\rho-r)-\pi^2(1-\rho^2)^2[\rho-r(2\rho-1)][\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]}{2\rho^3(\rho-r)}.$
	Магистральный привод. Режим максимального давления	$\tau_{и} = \frac{2\rho^7(\rho-r)^2(a+b+c)^2}{\pi^4(1-\rho^2)^2[\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]^2},$ $a = \pi^2 \cdot \frac{(1-\rho^2)[\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]}{2\rho^2(\rho-r)^2\sqrt{2\rho}}, \quad b = 4\nu\rho[\rho+(v a_1+r)],$ $a_1 = \frac{[\pi(1-\rho^2)-2(\rho+1)][\rho^2(1+\mu_{ж})+\mu_{ж}(1+\rho^2)]\sqrt{\rho-r(2\rho-1)}}{\rho^5(\rho-r)},$ $c = \frac{2\rho}{[\rho-r(2\rho-1)]}.$
Ударные механизмы третьего класса	Магистральный привод.	$\tau_{и} = \frac{\rho^6[\rho\sqrt{\rho}+\sqrt{\rho^2+\mu_{ж}(1-\rho)}]^2}{[\rho^2+\mu_{ж}(1-\rho)][1-\rho]^2(\rho^2+\mu_{ж})^2}.$
	Автономный привод. Режим максимальной скорости	$\tau_{и} = \frac{\rho^8[\rho^2-r^2(1-\rho)^2](a+b)^2}{4e^2\pi^2(1-\rho-2\nu\rho)(1-\rho)[\rho^2+\mu_{ж}(1-\rho)]^2[\rho^2+\mu_{ж}(1+\rho^2)]},$ $a = \rho^2[(1-\rho)(2\nu+1)]\sqrt{[\rho-r(1-\rho)]}, \quad e = 2\rho\nu\sqrt{\rho^2-r^2(1-\rho)^2}$ $b = \pi\nu\sqrt{(1-\rho-2\nu\rho)[\rho+r(1-\rho)](1-\rho)[\rho^2+\mu_{ж}(1-\rho)]^2}.$
Ударные механизмы четвертого класса	Магистральный привод.	$\tau_{и} = \frac{\rho^2[(1+\mu_{ж})\sqrt{(\rho-1)}+\sqrt{\rho(1+\mu_{ж})}]^2}{(\rho-1)(1+\mu_{ж})^2},$ $q > q^*, \quad q = q^* \cdot \rho, \quad \rho < 1.0.$
	Автономный привод. Режимы движения инерционным выбегом	$\tau_{и} = \frac{\rho^2[\alpha_V\sqrt{\rho-1}+(1-\lambda)\cdot\sqrt{\rho-1}+\sqrt{\lambda(1-\lambda)}]^2}{\alpha_V^2(\rho-1)},$ $\alpha_V = \frac{V_H}{V} < 1.0, \quad \lambda = \frac{X_H}{l_p} < 1.0,$
Ударные механизмы пятого класса	Магистральный привод.	$\tau_{и} = \frac{\rho^2[(\mu_{ж}+\rho)+\sqrt{(\rho-1)(\mu_{ж}+\rho)}]^2}{(\mu_{ж}+\rho)^2}$

Продолжение таблицы 1		
1	2	3
	Автономный привод. Режимы движения с инерционным выбегом	$\tau_{и} = \frac{\rho^2 [\alpha_V \sqrt{\rho-1} + (1-\lambda) \cdot \sqrt{\rho-1} + \sqrt{\lambda(1-\lambda)}]^2}{(1+\mu_{ж})^2 (1-\lambda)(\sqrt{\rho-1} \cdot \sqrt{1-\lambda} - \sqrt{\lambda})^2}$
Ударные механизмы шестого класса	Магистральный привод. Режим естественного торможения	$\tau_{и} = \frac{[\pi \sqrt{\varepsilon+1} + 2\sqrt{(1+\mu_{ж})(\varepsilon-1)}]^2}{4(\varepsilon-1)(1+\mu_{ж})}$ где $\varepsilon$ – степень сжатия газа в камере рабочего хода
	Автономный привод. Режим естественного торможения	$\tau_{и} = \frac{1}{4v^2}$ $v = \frac{V_0}{V} < 1.0$
	Автономный привод. Режимы движения с инерционным выбегом	$C_0 = \frac{C}{C+C_1} < 1.0$ $\tau_{и} = \frac{[2v(\varepsilon-1)(2-\lambda) + C_0(1-\lambda)(\varepsilon-1) - \rho\varepsilon(1-\lambda)(1-C_0)]^2}{4(\varepsilon-1)^2}$ $\lambda = \frac{X_H}{l_p} < 1.0; \quad \rho = \frac{P_0}{R} < 1.0$
Ударные механизмы седьмого класса	Магистральный привод. Режим естественного торможения	$\tau_{и} = \frac{[\pi \sqrt{(1+\mu_{ж})(\varepsilon+1)} + 2\sqrt{\varepsilon-1}]^2}{(\varepsilon+1) \cdot \pi^2 (1+\mu_{ж})}$
	Магистральный привод. Режимы движения с инерционным выбегом	$\tau_{и} = \frac{[2v(\varepsilon-1)(2-\lambda) + C_0(1-\lambda)(\varepsilon-1) - \rho \cdot \varepsilon(1-\lambda)(1-C_0)]^2}{v^2 (1-\lambda)^2 [(\varepsilon-1)(2+C_0) - \rho \cdot \varepsilon(1-C_0)]^2}$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Котылев, Ю.С. Прикладная теория гидравлических машин ударного действия/ Ю.С. Котылев, Д.Н. Ешуткин – М.: Машиностроение –1, 2007.-120с.
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы/ Т.М. Башта – М.: Машиностроение, 1982.-423с.
3. Горбунов, В.Ф. Гидравлические отбойные и бурильные молотки / В.Ф. Горбунов, Д.Н. Ешуткин, Г.С. Тен, Г.Г. Пивень – Новосибирск, 1982-94с.

#### Ешуткин Дмитрий Никитович

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», профессор  
Тел. (4862) 41-98-64

#### Котылев Юрий Евгеньевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, проректор по экономике и финансам.

#### Грядунова Елена Николаевна

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Тел. (4862) 41-98-72

#### Журавлева Анжелика Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Тел. (4862) 41-98-72

#### Талалаев Дмитрий Игоревич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Тел. (4862) 41-98-72

УДК 517.954: 517.977.56

О.В. ФОМИНОВА, В.И. ЧЕРНЫШЕВ

## УПРАВЛЕНИЕ ИЗГИБНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ СТЕРЖНЯ ПОСРЕДСТВОМ ОПОРНОГО МОМЕНТА

*Рассмотрен вариант управления изгибными колебаниями стержня посредством опорного момента, обеспечивающего полное гашение свободных колебаний стержня за конечное время.*

*The variant of the controlling of the deflecting oscillation of the bar by means of the supporting moment, giving the full damping of free oscillation of the bar for the final time was examined.*

Принимаем, что процесс изгибных колебаний стержня, расчетная схема которого представлена на рисунке 1, описывается следующим дифференциальным уравнением

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\tilde{\delta}(z - \ell)M(t). \quad (1)$$

Здесь  $EJ$  – жесткость стержня ( $Нм^2$ );

$m_0$  – масса стержня, отнесенная к единице длины ( $кг/м$ );

$\ell$  – длина стержня ( $м$ );

$z$  – продольная координата ( $м$ );

$y(z, t)$  – поперечные смещения стержня ( $м$ );

$\tilde{\delta}(z - \ell)$  – импульсная функция второго порядка ( $1/м^2$ );

$M(t)$  – опорный момент (управление) ( $Нм$ ).

Концевые условия:

$$y(0, t) = 0, \quad y(\ell, t) = 0, \quad (2)$$

$$y_{zz}(0, t) = 0, \quad EJ \cdot y_{zz}(\ell + \Delta\ell, t) = M(t) \quad (\Delta\ell \ll \ell).$$

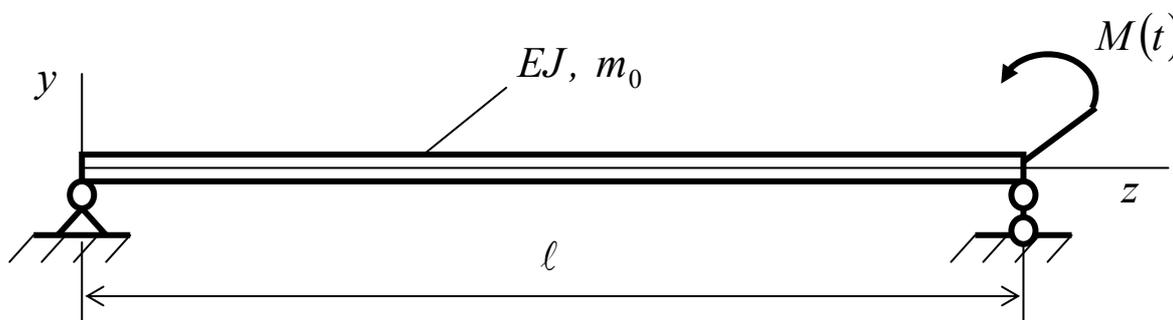


Рисунок 1 – Расчетная схема стержня

Начальные условия:

$$y(z, 0) = \varphi(z), \quad (3)$$

$$y_t(z, 0) = \psi(z).$$

Требуется определить управление  $M(t)$ , при котором за время  $T$  произойдет полное гашение возбуждаемых свободных колебаний стержня.

Решение  $y(z, t)$  дифференциального уравнения (1) должно удовлетворять конечным условиям

$$\begin{aligned} y(z, T) &= 0, \\ y_t(z, T) &= 0. \end{aligned} \tag{4}$$

Решение задачи ищем в виде

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(z) f_n(t), \tag{5}$$

где  $u_n = \sin \frac{n\pi z}{\ell}$  – амплитудная функция;  $f_n$  – неизвестная функция времени.

В дальнейшем будем учитывать следующие соотношения:

$$EJ \frac{d^4 u_n}{dz^4} = m_0 k_n^2 u_n,$$

$$k_n = \frac{n^2 \pi^2}{a},$$

$$a = \sqrt{\frac{m_0 \ell^4}{EJ}}.$$

После подстановки решения (5) в дифференциальное уравнение (1) умножим обе его части на амплитудную функцию  $u_n$  и проинтегрируем по длине стержня. В результате этого получим уравнения

$$\int_0^{\ell} EJ u_n^{IV} f_n u_n dz + \int_0^{\ell} m_0 u_n \ddot{f}_n u_n dz = - \int_0^{\ell} \tilde{\delta}(z - \ell) M(t) u_n dz$$

или

$$\ddot{f}_n + k_n^2 f_n = \frac{2n\pi(-1)^n}{m_0 \ell^2} M(t), \quad n = 1, 2, \dots \tag{6}$$

Обозначая составляющие начальные условия

$$f_n(0) = \varphi_n, \quad \dot{f}_n(0) = \psi_n,$$

запишем общие решения уравнений (6) в следующем виде

$$f_n = \varphi_n \cos k_n t + \frac{\Psi_n}{k_n} \sin k_n t + \frac{2n\pi(-1)^n}{m_0 \ell^2 k_n} \int_0^t M(\tau) \sin k_n (t - \tau) d\tau \quad (7)$$

Условия (4) выполняются если

$$\begin{aligned} f_n(T) &= 0, \\ \dot{f}_n(T) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Поэтому каждое  $n$ -е уравнение (7) в момент времени  $T$  позволяет получить систему двух уравнений

$$\varphi_n \cos k_n T + \frac{\Psi_n}{k_n} \sin k_n T + \frac{2n\pi(-1)^n}{m_0 \ell^2 k_n} \int_0^T M(\tau) \sin k_n (T - \tau) d\tau = 0, \quad (9)$$

$$-\varphi_n k_n \sin k_n T + \Psi_n \cos k_n T + \frac{2n\pi(-1)^n}{m_0 \ell^2} \int_0^T M(\tau) \cos k_n (T - \tau) d\tau = 0. \quad (10)$$

Если  $T = \frac{2a}{\pi} = \frac{2\pi}{k_1}$ , то

$$\sin k_n (T - \tau) = -\sin k_n \tau,$$

$$\cos k_n (T - \tau) = \cos k_n \tau$$

и равенства (9) и (10) преобразуются к виду

$$\varphi_n - \frac{(-1)^n T}{nm_0 \ell^2} \int_0^T M(\tau) \sin k_n \tau d\tau = 0, \quad (11)$$

$$\Psi_n + \frac{(-1)^n T}{nm_0 \ell^2} k_n \int_0^T M(\tau) \cos k_n \tau d\tau = 0. \quad (12)$$

Разложим управление  $M(\tau)$  в ряд

$$M(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} (M_n^{(1)} \sin k_n \tau + M_n^{(2)} \cos k_n \tau). \quad (13)$$

После подстановки отдельных членов ряда (13) в равенства (11), (12) и взятия интегралов получим

$$M_n^{(1)} = \varphi_n \frac{2nm_0 \ell^2}{(-1)^n T^2},$$

$$M_n^{(2)} = -\Psi_n \frac{2nm_0\ell^2}{(-1)^n k_n T^2}.$$

Таким образом, управление  $M(t)$ , которое обеспечивает гашение изгибных колебаний стержня, может быть рассчитано по формуле

$$M(t) = \frac{2m_0\ell^2}{T^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(-1)^n} \left( \varphi_n \sin k_n t - \frac{\Psi_n}{k_n} \cos k_n t \right). \quad (14)$$

Формула (14) дает решение поставленной задачи. Она определяет управление  $M(t)$  (как функцию изменения опорного момента), которое полностью гасит свободные изгибные колебания стержня за отрезок времени  $0 \dots \frac{2a}{\pi}$ .

Заметим, что в случае, когда берется интервал времени  $T = \frac{2a}{\pi} j$  ( $j = 2, 3, \dots$ ), то формула (14) преобразуется к виду

$$M(t) = \frac{2m_0\ell^2 j}{T^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(-1)^n} \left( \varphi_n \sin k_n t - \frac{\Psi_n}{k_n} \cos k_n t \right). \quad (15)$$

Кроме того, цель управления (4) достигается и тогда, когда опорный момент (14) имеет произвольную постоянную составляющую  $M_0$ , т.е.

$$M(t) = \frac{2m_0\ell^2}{T^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(-1)^n} \left( \varphi_n \sin k_n t - \frac{\Psi_n}{k_n} \cos k_n t \right) + M_0. \quad (16)$$

Действительно, значение функции (7) в момент времени  $T = \frac{2a}{\pi} j$  не изменится (останется равным нулю) поскольку интегральное слагаемое  $\int_0^T M_0 \sin k_n (T - \tau) d\tau = 0$ .

Данное обстоятельство позволяет выбирать постоянную составляющую опорного момента  $M_0$ , используя какое-либо дополнительное условие. Например, если принять условие  $M(T) = 0$ , то из уравнения (16) следует, что

$$M_0 = \frac{2m_0\ell^2}{T^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(-1)^n} \frac{\Psi_n}{k_n}. \quad (17)$$

На рисунке 2 приведены результаты расчета опорного момента по формуле (16) в зависимости от начальных условий (3).

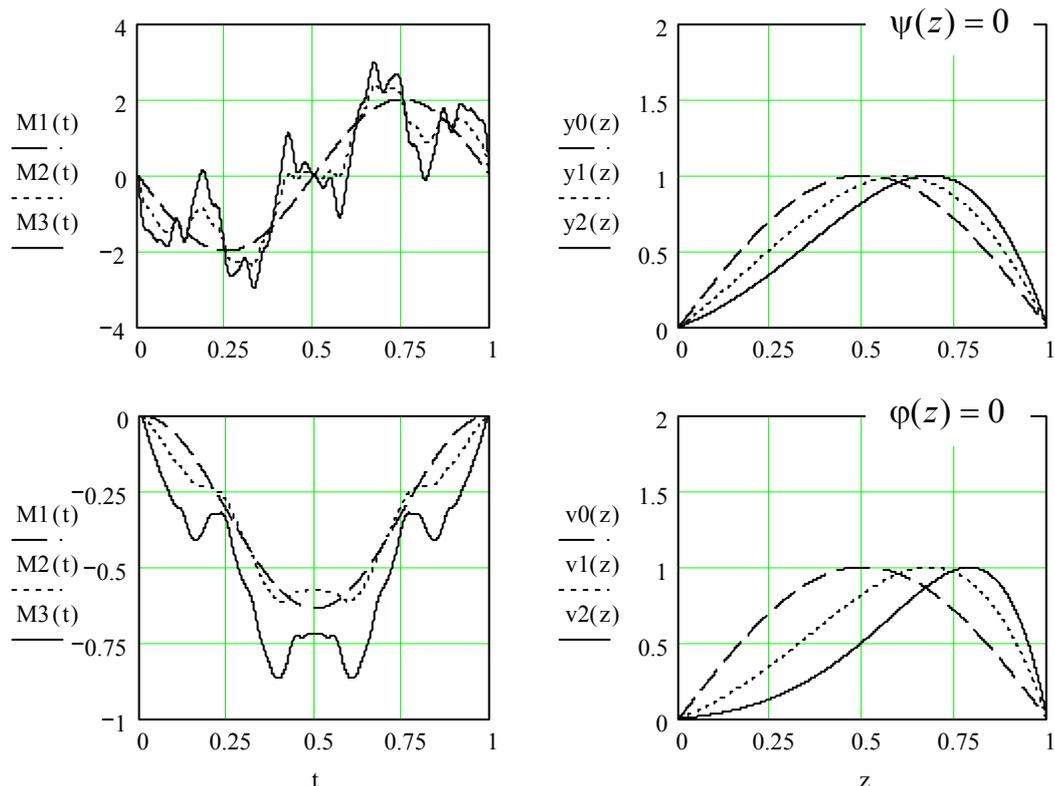


Рисунок 2 – Графики опорных моментов и начальных условий  $\varphi(z)$ ,  $\psi(z)$ :  
 $u_n(z) = \varphi(z)$ ,  $v_n(z) = \psi(z)$ .

В результате проведения расчетов установлено, что ряд (16) быстро сходится и влиянием высших гармоник, когда  $n > 5$ , практически можно пренебречь.

Как видно, при симметричной форме начального отклонения изогнутой оси стержня управление (опорный момент) изменяется по гармоническому закону с частотой равной основной частоте собственных колебаний стержня. Смена знака управления происходит в момент времени  $T/2$ .

При ударных воздействиях управление не изменяет знак и является симметричной функцией.

Если симметрия функций  $\varphi(z)$  и  $\psi(z)$  нарушается (в последнем случае «точка удара» смещена к опоре), то это приводит к появлению дополнительных составляющих управления, изменяющихся по гармоническому закону с частотой высших форм собственных колебаний стержня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Знаменская Л.Н. Управление упругими колебаниями. – М.: Физматлит, 2004. – 176 с.
2. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.

Баумана, 2001. – 272 с.

### Фоминова О.В.

к.т.н., доц. кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ОрелГТУ.  
 (4862) 474749

### Чернышев В.И.

д.т.н., проф. кафедры «Динамика и прочность машин» ОрелГТУ.  
 (4862) 474749  
 E-mail: [chernv@ostu.ru](mailto:chernv@ostu.ru)



$$\sigma_y = N(\theta); \quad \tau_{r\theta} = T(\theta) \quad \text{при } r = R, \quad (1)$$

причем главный вектор и главный момент этих усилий равны нулю.

Пусть в твердом топливе имеется  $N_0$  прямолинейных трещиновидных полостей длиной  $2\ell_{0k}$  ( $k=1, 2, \dots, N_0$ ). В центрах трещиновидных полостей поместим начала локальных систем координат  $x_k O_k y_k$ , оси  $x_k$  которых совпадают с линиями трещин и образуют углы  $\alpha_k$  с осью  $x$  (рис. 1). Рассматривается модель трещины с силами сцепления (связями), непрерывно распределенными в узких концевых зонах трещин (области  $D_k$ ) и имеющими заданную диаграмму деформирования. Силы сцепления (связи) будут сосредоточены в некоторых узких областях  $D_k$ , размеры этих областей заранее неизвестны и должны быть определены из решения задачи. Всюду в дальнейшем граничные условия с поверхности полостей и областей  $D_k$  сносим на прямые  $y_k = 0$  точно также, как это делается, например, в теории тонкого крыла в аэродинамике.

Рассматривается случай плоской стационарной задачи. По мере нагружения тела в связях, соединяющих берега трещиновидных полостей в концевых зонах будут возникать нормальные  $q_{y_k}(x_k)$  и касательные  $q_{x_k y_k}(x_k)$  ( $k=1, 2, \dots, N_0$ ) усилия. Величины этих напряжений и размеры  $d_{1k}$  и  $d_{2k}$  ( $k=1, 2, \dots, N_0$ ) концевых зон заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи механики разрушения. Так как, концевые зоны малы по сравнению с остальной частью топлива, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. Таким образом, к берегам трещиновидной полости в концевых зонах будут приложены нормальные и касательные напряжения численно равные  $q_{y_k}(x_k)$  и  $q_{x_k y_k}(x_k)$  ( $k=1, 2, \dots, N_0$ ), соответственно.

Обозначим через  $L' = \sum_{k=1}^N L'_k$  – совокупность берегов трещиновидных полостей,

поверхности которых горят; а через  $L'' = \sum_{k=1}^N L''_k$  – совокупность концевых зон предразрушения, в которых берега взаимодействуют со связями.

Краевые условия в рассматриваемой задаче имеют вид

$$\sigma_{y_k} = -p_k(x_k); \quad \tau_{x_k y_k} = 0 \quad \text{на } L'_k \quad (k=1, 2, \dots, N_0) \quad (2)$$

$$\sigma_{y_k} = q_{y_k}(x_k); \quad \tau_{x_k y_k} = q_{x_k y_k}(x_k) \quad \text{на } L''_k,$$

где  $p_k(x_k)$  – интенсивность давления газа в  $k$ -той полости;  $L'_k$  – берега  $k$ -той трещиновидной полости, поверхность которой горит;  $L''_k$  – берега концевых зон  $k$ -той трещиновидной полости.

Для замкнутости основные соотношения задачи должны быть дополнены уравнениями газовой динамики и уравнениями, связывающими перемещения раскрытия берегов концевых зон и усилия в связях.

Уравнения течения газа в  $k$ -ой полости для плоского стационарного случая имеют вид [5]

$$p_k = C_{0k} \rho_k^\chi, \quad \frac{V_{xk}^2}{2} + \frac{\chi}{\chi-1} \frac{p_k}{\rho_k} = C_{1k} \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} (h_k \rho_k V_{xk}) = \rho_s f(p_k); \quad h_k = h_{0k}(x) + \int f(p_k) dp_k + v_k;$$

$$C_{0k} = p_{0k} \rho_{0k}^{-\chi}; \quad C_{1k} = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_s}{\rho_{0k}} \right)^2 f^2(p_{1k}) + \frac{\chi}{\chi - 1} \frac{p_{1k}}{\rho_{1k}}.$$

Здесь  $\chi$  – показатель адиабаты;  $\rho_s$  – плотность твердой фазы;  $V_{x_k}$  – скорость газа;  $p_{0k}$ ,  $\rho_{0k}$  и  $p_{1k}$ ,  $\rho_{1k}$  – давление и плотность газа в камере сгорания при  $x_k = 0$  и в конце полости при  $x_k = \ell_k - d_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ ) соответственно (величины с индексом  $1k$  подлежат определению);  $h_{0k}(x)$  – заданная толщина начальной трещиновидной полости;  $f(p)$  – некоторая функция.

Уравнения, связывающие перемещения раскрытия берегов концевых зон и усилия в связях, можно представить в следующем виде [6, 7]:

$$(v_k^+ - v_k^-) - i(u_k^+ - u_k^-) = C(x_k, \sigma_k) [q_{y_k}(x_k) - iq_{x_k y_k}(x_k)] \quad (k = 1, 2, \dots, N_0), \quad (4)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ; функции  $C(x_k, \sigma_k)$  можно рассматривать как эффективные податливости соответствующих связей, зависящие от натяжения связей;  $\sigma_k = \sqrt{q_{y_k}^2 + q_{x_k y_k}^2}$  – модуль вектора усилий в соответствующих связях.

При постоянных значениях  $C$  имеем в (4) линейный закон деформирования.

Краевые условия задачи (1) и (2) с помощью формул Колосова-Мусхелишвили [8] запишем в виде граничной задачи для отыскания комплексных потенциалов  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  в следующем виде

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - e^{2i\theta} [\overline{\tau} \Phi'(\tau) + \Psi(\tau)] = N - iT \quad (5)$$

$$\Phi(t_n) + \overline{\Phi(t_n)} + t_n \overline{\Phi'(t_n)} + \overline{\Psi(t_n)} = a \quad (n = 1, 2, \dots, N_0) \quad (6)$$

Здесь  $\tau = R \exp(i\theta)$ ;  $a = p_n(t_n)$  на берегах полости;  $a = q_{y_n}(t_n) - iq_{x_n y_n}(t_n)$  на берегах концевых зон трещиновидной полости;  $t_n$  – аффикс точек берегов  $n$ -ой трещиновидной полости с концевыми зонами.

Комплексные потенциалы  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ , дающие решение краевой задачи (5) – (6), ищем в виде

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z) + \Phi_2(z), \quad \Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z) + \Psi_2(z), \quad (7)$$

где потенциалы  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  определяют поле напряжений и перемещений в сплошном бездефектном топливе.

Это распределение напряжений и перемещений в топливе без трещиновидных полостей определяются формулами Н.И. Мусхелишвили

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_L [N(\tau) + iT(\tau)] \left( \frac{1}{\tau - z} - \frac{1}{2\tau} \right) d\tau, \quad \Psi_0(z) = \frac{1}{z^2} \Phi_0(z) + \frac{1}{z^2} \overline{\Phi_0} \left( \frac{1}{z} \right) - \frac{1}{z} \Phi_0'(z)$$

Комплексные потенциалы  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  ищем [9] в виде

$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \frac{g_k(t)}{t - z_k} dt, \quad \Psi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} e^{-2i\alpha_k} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[ \frac{\overline{g_k(t)}}{t - z_k} - \frac{\overline{T_k} e^{i\alpha_k} g_k(t)}{(t - z_k)^2} \right] dt, \quad (8)$$

где  $T_k = t e^{i\alpha_k} + z_k^0$ ;  $z_k = e^{-i\alpha_k} (z - z_k^0)$

Здесь  $g_k(t)$  – искомые функции, характеризующие разрыв перемещений при переходе через линию соответствующей трещиновидной полости с концевыми зонами

$$g_k(x_k) = \frac{2\mu}{i(1 + \kappa_0)} \frac{\partial}{\partial x} [u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0) + i(v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0))] \quad (k = 1, 2, \dots, N_0),$$

где  $\kappa_0 = 3 - 4\nu$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала топлива;  $\mu$  – модуль сдвига.

Комплексные потенциалы  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  должны быть так подобраны, чтобы они компенсировали на круговой границе топлива напряжения, возникающие от функций  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$ . Найдем потенциалы  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$ .

Используя формулу Колосова-Мусхелишвили [8]

$$\sigma_r^1 + i\tau_{r\theta}^1 = \Phi_1(\tau) + \overline{\Phi_1(\tau)} - e^{-2i\theta} [z\overline{\Phi_1'(\tau)} + \overline{\Psi_1(\tau)}],$$

вычислим комбинацию напряжений  $\sigma_r^1 + i\tau_{r\theta}^1$ , вызванных на круговой границе топлива  $L$  разрывами смещений  $g_k(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ )

$$\sigma_r^1 + i\tau_{r\theta}^1 = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left\{ \left[ \frac{1}{t - z_k} - \frac{e^{2i\alpha_k}}{\sigma^2(t - \bar{z}_k)^2} \right] g_k(t) + \left[ \frac{1}{t - \bar{z}_k} - \frac{(\sigma - T_k)e^{i\alpha_k}}{\sigma^2(t - \bar{z}_k)^2} \right] \overline{g_k(t)} \right\} dt,$$

где  $\sigma = \exp(i\theta)$ ;  $z_k = (\sigma - z_k^0)e^{-i\alpha_k}$ .

Для определения комплексных потенциалов  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  решаем вспомогательную задачу для круга, когда на его границе приложена нагрузка

$$N(\sigma) + iT(\sigma) = -(\sigma_r^1 + i\tau_{r\theta}^1).$$

Используя решение Н.И. Мусхелишвили задачи теории упругости для круга, после вычисления интегралов с помощью теории вычетов, получим

$$\Phi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left\{ \left( \frac{1}{z\bar{T}_k - 1} + \frac{1}{2} \right) \bar{T}_k e^{2i\alpha_k} g_k(t) + \right. \tag{9}$$

$$\left. + \left[ \frac{T_k}{2} - \frac{z^2\bar{T}_k - 2z + T_k}{(z\bar{T}_k - 1)^2} \right] e^{-i\alpha_k} \overline{g_k(t)} \right\} dt;$$

$$\Psi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[ \frac{e^{i\alpha_k} \bar{T}_k^3}{(z\bar{T}_k - 1)^2} g_k(t) + (z^2 T_k + 4 - 3z\bar{T}_k + zT_k \bar{T}_k^2 - \right.$$

$$\left. - 3T_k \bar{T}_k) \frac{\bar{T}_k e^{-i\alpha_k}}{(z\bar{T}_k - 1)^3} \overline{g_k(t)} \right] dt;$$

Удовлетворяя функциями (7) граничным условиям (6) на берегах полостей с концевыми зонами, получим систему  $N_0$  сингулярных интегральных уравнений, относительно неизвестных функций  $g_k(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ ):

$$\sum_{k=1}^{N_0} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [R_{nk}(t, x)g_k(t) + S_{nk}(t, x)\overline{g_k(t)}] dt = \pi f_n(x) \quad |x_n| \leq \ell_n \quad (n = 1, 2, \dots, N_0) \tag{10}$$

Здесь  $f_n(x) = q_{y_n} - iq_{x_n y_n} - [\Phi_0(x) + \overline{\Phi_0(x)} + x\overline{\Phi_0'(x)} + \overline{\Psi_0(x)}]$

Функции  $R_{nk}(t, x)$  и  $S_{nk}(t, x)$  определяются следующими формулами

$$R_{nk}(t, x) = \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left( \frac{1}{T_k - X_n} + \frac{e^{-2i\alpha_n}}{\bar{T}_k - \bar{X}_n} \right) - \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left[ \frac{X_n \bar{T}_k^2}{1 - X_n T_k} + \right.$$

$$\left. + \frac{\bar{X}_n^2 T_k - 2\bar{X}_n + \bar{T}_k}{(1 - T_k \bar{X}_n)^2} + e^{-2i\alpha_n} \frac{2X_n(T_k \bar{T}_k - 1) + T_k^2(\bar{X}_n + \bar{T}_k)(\bar{X}_n T_k - 3) + 4T_k}{(1 - T_k \bar{X}_n)^3} \right];$$

$$S_{nk}(t, x) = \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[ \frac{1}{\bar{T}_k - \bar{X}_n} - \frac{T_k - X_n}{(\bar{T}_k - X_n)^2} e^{-2i\alpha_n} \right] - \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[ \frac{T_k^2 \bar{X}_n}{1 - T_k \bar{X}_n} + \right. \\ \left. + \frac{X_n^2 \bar{T}_k - 2X_n + T_k}{(1 - X_n \bar{T}_k)^2} + \frac{T_k^2 (X_n - T_k) e^{-2i\alpha_n}}{(1 - T_k \bar{X}_n)^2} \right]; \quad X_n = x e^{i\alpha_n} + z_n^0$$

Переменные  $x$ ,  $z_n^0$  и  $\ell_n$  – безразмерные, отнесенные к радиусу топлива  $R$ .

К системе сингулярных интегральных уравнений (10) для внутренних трещиновидных полостей следует добавить дополнительные условия, вытекающие из физического смысла и означающие однозначность смещений при обходе контура полостей с концевыми зонами:

$$\int_{-\ell_k}^{\ell_k} g_k(t) dt = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (11)$$

Если представить неизвестные функции  $g_k(x_k)$ , а также нагрузку  $a(x_k)$  в виде

$$g_k(x_k) = v_k(x_k) - iu_k(x_k), \quad a(x_k) = \sigma_k^0(x_k) - i\tau_k^0(x_k),$$

то из системы  $N_0$  комплексных сингулярных интегральных уравнений после отделения действительных и мнимых частей получим для определения  $v_k(x_k)$  и  $u_k(x_k)$  систему  $2N_0$  действительных сингулярных интегральных уравнений.

Для левой части соотношения (4) имеем

$$(v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0)) - i(u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0)) = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu_1} \int_{-\ell_k}^{x_k} g_k(x_k) dx_k \quad (12) \\ (k = 1, 2, \dots, N_0)$$

С учетом (12) соотношение (4) запишем в следующем виде

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} g_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k(x_k)) [q_{y_k}(x_k) - iq_{x_k y_k}(x_k)] \quad (13)$$

Отделяя в (13) действительные и мнимые части, находим

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} v_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k(x_k)) q_{y_k}(x_k) \quad (14)$$

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} u_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k(x_k)) q_{x_k y_k}(x_k) \quad (15)$$

Таким образом, система сингулярных интегральных уравнений (10) с дополнительными условиями (11), уравнения течения газа (3) для каждой полости и уравнения (14), (15) должны решаться совместно. С помощью замены переменных приведем все интервалы интегрирования к одному отрезку  $[-1, 1]$ .

Система комплексных сингулярных интегральных уравнений (10) при дополнительных условиях (11) с помощью процедуры алгебраизации сводится [9, 10] к системе  $N_0 \times M$  алгебраических уравнений для определения  $N_0 \times M$  неизвестных  $g_n(t_m)$  ( $n = 1, 2, \dots, N_0$ ;  $m = 1, 2, \dots, M$ ):

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N_0} \ell_k \left[ g_k^{(0)}(t_m) R_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) + \overline{g_k^{(0)}(t_m)} S_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) \right] = f_n(x_r) \quad (16)$$

$$(n = 1, 2, \dots, N_0; r = 1, 2, \dots, M-1),$$

$$\sum_{m=1}^M g_n^{(0)}(t_m) = 0$$

Здесь  $t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ),  $x_r = \cos \frac{\pi r}{M}$  ( $r = 1, 2, \dots, M-1$ ).

Перейдя в (16) к комплексно сопряженным значениям, получаем еще  $N_0 \times M$  алгебраических уравнений.

В правые части алгебраических систем, заменяющих интегральные уравнения, входят неизвестные значения напряжений  $q_{y_k}(t_{m_1,k})$  и  $q_{x_k y_k}(t_{m_1,k})$  в узловых точках  $t_{m_1,k}$  ( $m_1 = 1, 2, \dots, M_{1,k}; k = 1, 2, \dots, N$ ), входящих в концевые зоны.

Для построения недостающих уравнений потребуем выполнения условий (14), (15) в узловых точках  $t_{m_1,k}$ , содержащихся в концевых зонах предразрушения. В результате получим  $2 \times N_0$  системы из  $M_{1,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ ) уравнений каждая для определения приближенных значений  $q_{y_k}(t_{m_1,k})$  и  $q_{x_k y_k}(t_{m_1,k})$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0; m_1 = 1, 2, \dots, M_{1,k}$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 v_k(t_{1,k}) = C(t_{1,k}, \sigma_k(t_{1,k})) q_{y_k}(t_{1,k}), \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \\ C_0 (v_k(t_{1,k}) + v_k(t_{2,k})) = C(t_{2,k}, \sigma_k(t_{2,k})) q_{y_k}(t_{2,k}), \\ \dots \\ C_0 \sum_{m_1=1}^{M_{1,k}} v_k(t_{m_1,k}) = C(t_{M_{1,k}}, \sigma_k(t_{M_{1,k}})) q_{y_k}(t_{M_{1,k},k}) \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 u_k(t_{1,k}) = C(t_{1,k}, \sigma_k(t_{1,k})) q_{x_k y_k}(t_{1,k}) \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \\ C_0 (u_k(t_{1,k}) + u_k(t_{2,k})) = C(t_{2,k}, \sigma_k(t_{2,k})) q_{x_k y_k}(t_{2,k}), \\ \dots \\ C_0 \sum_{m_1=1}^{M_{1,k}} u(t_{m_1,k}) = C(t_{M_{1,k}}, \sigma_k(t_{M_{1,k}})) q_{x_k y_k}(t_{M_{1,k},k}), \end{array} \right. \quad (18)$$

где  $C_0 = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M}$ .

Полученные алгебраические системы уравнений не являются пока замкнутыми. Для замыкания алгебраических систем необходимо добавить условия конечности напряжений у вершин концевых зон (условия разрешимости краевой задачи). В случае, когда все  $N_0$  трещиновидные полости являются внутренними, эти условия можно представить в виде

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_n^{(0)}(t_m) \cdot ctg \frac{2m-1}{4M} \pi = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N_0); \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_n^{(0)}(t_m) \cdot tg \frac{2m-1}{4M} \pi = 0$$

Совокупность  $2 \times N_0$  уравнений позволяет определить размеры концевых зон трещиновидных полостей. Из-за неизвестных длин концевых зон объединенная алгебраическая система уравнений даже для линейно-упругих связей не линейна. Ее численное решение позволяет найти значения  $g_k^{(0)}(t_m)$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0; m = 1, 2, \dots, M$ ), усилия в связях, давление газа в полостях, а также размеры концевых зон. Зная функции  $g_k(x_k)$ ,  $p_k(x_k)$ ,  $q_{y_k}(x_k)$  и  $q_{x_k y_k}(x_k)$ , можно найти напряженно-деформированное состояние топлива.

После нахождения искомым функций  $g_k(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ ) вычислялось раскрытие трещиновидной полости у вершин любой концевой зоны по соотношению

$$2\nu_{0k} = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{\ell_{0k}}^{\ell_k} g_k(x_k) dx_k \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (20)$$

В расчетах было принято  $M = 30$ . С помощью критерия критического раскрытия трещиновидной полости найдено условие определяющее предельный уровень интенсивности давления газа в полости топлива для окрестности каждой вершины трещиновидной полости.

Значение интенсивности давления газа  $p_{*k}$ , вызывающий рост  $k$ -той трещиновидной полости определяется из соотношения

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{\ell_{0k}}^{\ell_k} g_k(x_k) dx_k = \delta_c \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (21)$$

Критическим значением интенсивности давления газа для горящего твердого топлива будет минимальное среди  $p_{*k}$  ( $k = 1, 2, \dots, N_0$ )

$$p_* = \min\{p_{*k}\}, \quad k = 1, 2, \dots, N_0 \quad (22)$$

Локальное условие устойчивости (безопасности) режима «горение–разрушение» для трещиновидной полости можно записать также в следующем виде:

для левого конца трещиновидных полостей

$$C(-\ell_{0k}, \sigma_k(-\ell_{0k}))\sigma_k(-\ell_{0k}) \leq \delta_c \quad k = 1, 2, \dots, N_0 \quad (23)$$

для правого конца трещиновидных полостей

$$C(\ell_{0k}, \sigma_k(\ell_{0k}))\sigma_k(\ell_{0k}) \leq \delta_c \quad k = 1, 2, \dots, N_0 \quad (24)$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cox, B.N. Concepts for bridged cracks fracture and fatigue / B.N. Cox, D.B. Marshall // Acta Metall Mater., 1994, v.42, No 2, p.341–363.
2. Ji H. Adhesion via Connector Molecules: The Many-stitch Problem / H. Ji, P.G. de Gennes // Macromolecules. 1993. v. 26. P. 520–525.
3. Needleman, A. An analysis of decohesion an imperfect interface / A. Needleman // Int. J. Fracture, 1990. v. 42, No 1, p.21–40.
4. Goldstein, R.V. Modeling of the adhesion strength and fracture kinetics of the microelectronic package polymer-polymer joints / R.V. Goldstein, V.F. Bakirov, M.N. Perelmuter // In: Proc. Inst. Technol. Russian Ac. of Sci. v. 13. Modeling and Simulation of Submicron Technology and Devices, 1997. P. 115–125.
5. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов – М.: Наука, 1974. – 640 с.
6. Гаджиев, В.Д. Предельно-равновесное состояние детали типа втулки при наличии трещин со связями между берегами / В.Д. Гаджиев, В.М. Мирсалимов // Оптимальное проектирование механических систем. Баку: Элм, 1999. С. 50–63.
7. Гольдштейн, Р.В. Рост трещин по границе соединения материалов / Р.В. Гольдштейн, М.Н. Перельмутер // Проблемы механики. – М.: Физматлит, 2003, С. 221 – 238.
8. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили – М.: Наука, 1966. – 707 с.
9. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин – Киев: Наукова думка, 1976. – 443с.
10. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов – М.: Наука, 1987. – 256 с.

**Рустамов Бахтияр Эйюб оглы**

Азербайджанская государственная академия физической культуры и спорта, г. Баку

Доцент кафедры высшей математики и вычислительной техники

тел.: (+99412) 564-33-75 раб.; (+99412) 462-22-81 дом.

e-mail: [irakon63@hotmail.com](mailto:irakon63@hotmail.com)

УДК 533.72

С.А. САВКОВ, Е.Ю. ТЮЛЬКИНА

## О ВЫЧИСЛЕНИИ ПОТОКА ТЕПЛА МЕЖДУ КОАКСИАЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ В РАЗРЕЖЕННОМ МОЛЕКУЛЯРНОМ ГАЗЕ

*Рассмотрен вопрос о решении модели Хансона-Морзе линеаризованного уравнения Ван Чанга-Уленбека в приложении к вычислению потока тепла в цилиндрическом слое молекулярного газа. Для решения кинетического уравнения используется процедура, аналогичная методу полупространственных моментов. Приведены результаты расчетов в случае чисто диффузного закона отражения. Получены значения коэффициента скачка температуры для конкретных газов.*

*The solution of the linearized Wang Chang-Uhlenbeck equation using the Hanson-Morse model for calculating the heat flux in cylinder molecular gas layer has been considered. A procedure that is analogous to the method of half-spatial moments is applied to solving the kinetic equation. The calculation results for the case of purely diffuse reflection are presented. The values of the temperature jump coefficient for specific gases have been obtained.*

Изучение процесса теплопереноса между коаксиальными цилиндрами имеет важное теоретическое и прикладное значение. Достаточно подробный обзор публикация по этому вопросу представлен в [1-3]. Однако при теоретическом описании указанного явления, как правило, применяют метод Лиза [4], или вариационные методы [5, 6], не дающие реального описания состояния газа. Более строгий подход рассматривался в работах [7, 8] применительно к модели Бхатнагара – Гросса – Крука (БГК) для случая атомарных газов.

Данная работа посвящена рассмотрению молекулярных газов, для описания состояния которых применяется уравнение Ван Чанга – Уленбека [10] с интегральным оператором столкновений в форме Хансона – Морзе.

Рассмотрим слой газа, заключенный между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами  $R_1 < R_2$ , на поверхности которых поддерживается постоянная температура  $T_s^1 > T_s^2$ . Перепад  $\Delta T_s = T_s^1 - T_s^2$  считается достаточно малым, для того, чтобы ограничиться линейным приближением.

Введем цилиндрическую систему координат, ось OZ которой совпадает с осью цилиндров. Для описания состояния газа примем уравнение Ван Чанга – Уленбека

$$\mathbf{V}\nabla f_l = J_{st}[f_l]. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{V}$  – собственная (тепловая) скорость поступательного движения молекул газа,

$f_l$  – функция распределения для молекул, находящихся в состоянии с внутренней энергией  $E_l$ ;  $J_{st}$  – интегральный оператор столкновений.

В силу линейности, представим функцию распределения в виде

$$f_l = f_l^0(1 + \phi_l),$$

где

$$f_l^0 = n_0 \left( \frac{m}{2\pi k T_0} \right)^{3/2} \frac{1}{\Theta} \exp(-C^2 - \varepsilon_l) - \text{равновесная функция распределения;}$$

$$C = V \sqrt{\frac{m}{2kT_0}}, \quad \varepsilon_l = \frac{E_l}{kT_0}, \quad \Theta = \sum_l \exp(-\varepsilon_l);$$

$m$  – масса молекул газа;

$T_0, n_0$  – некоторые, принятые за равновесные, значения температуры и концентрации молекул газа;

$k$  – постоянная Больцмана.

Поправка  $\varphi_l$  определяется из соответствующего (1) линеаризованного уравнения

$$C_r \frac{\partial \varphi_l}{\partial r} + \frac{C_\varphi^2}{r} \frac{\partial \varphi_l}{\partial C_r} = I_{st}[\varphi_l]. \quad (2)$$

В качестве интеграла столкновения примем модель Хансона-Морзе [9], которая широко применяется на практике:

$$I_{st}[\varphi_l] = \sum_{m=1}^6 \Psi_m A_m - \varphi_l. \quad (3)$$

Здесь:  $\Psi_1 = \rho_1, \quad \Psi_2 = \frac{2}{3} \rho_2 \left(1 - \frac{2G}{3Z}\right) + \frac{2}{3Z} \rho_3, \quad \Psi_3 = \frac{2}{3Z} \rho_2 + \frac{1}{G} \left(1 - \frac{1}{Z}\right) \rho_3,$

$$\Psi_4 = \frac{4}{9} \rho_4 \left(1 - \frac{G}{Z}\right) + \frac{2}{3Z} \rho_5, \quad \Psi_5 = \rho_4 \frac{2}{3Z} + (1-F) \frac{2}{G} \rho_5, \quad \Psi_6 = 2\rho_6,$$

$$A_m = \frac{1}{\pi^{3/2} \Theta} \sum_l \int \varphi_l \rho_m \exp(-C^2 - \varepsilon_l) d^3C,$$

$$\rho_1 = 1, \quad \rho_2 = C^2 - \frac{3}{2}, \quad \rho_3 = \varepsilon_l - G, \quad \rho_4 = C_r \left(C^2 - \frac{5}{2}\right),$$

$$\rho_5 = C_r(\varepsilon_l - G), \quad \rho_6 = C_r,$$

$$F = \frac{\frac{10}{9} \frac{G}{Z} + \frac{2}{3} \left(\frac{4}{9} + \frac{5G}{9Z}\right) G + \frac{5G}{18Z^2} \left(\frac{3}{2} + G\right) F_l}{\left(\frac{4}{9} + \frac{5G}{9Z}\right) \left(\frac{3}{2} + G\right) F_l - \frac{5}{3}},$$

$$G = \frac{c_v^{int}}{k} = \frac{1}{\Theta} \sum_l \varepsilon_l \exp(-\varepsilon_l),$$

$c_v^{int}$  – теплоемкость внутренних степеней свободы, приходящихся на одну молекулу газа,  $Z$  – параметр, определяющий отношение времени релаксации внутренней энергии молекул к среднему времени между их столкновениями.  $F_l$  – фактор Эйкена.

За единицу длины выбрана величина  $l = \frac{\eta}{n_0} \sqrt{\frac{2}{mkT_0}}$ ,  $\eta$  – коэффициент вязкости газа.

В качестве граничного условия на поверхности цилиндров примем закон чисто диффузного отражения молекул газа

$$\varphi_l|_{r=R_k} = \frac{\Delta n}{n_0} + \left( C^2 - \frac{3}{2} + \varepsilon_l - G \right) \frac{\Delta T}{T_0}, \quad k = 1, 2. \quad (4)$$

Учитывая разрывный характер функции распределения на поверхности каждого цилиндра, а также тот факт, что с любой точкой объема связаны три инвариантные области в пространстве скоростей, границы которых молекулы газа пересекают только за счет столкновений между собой, решение уравнения (2) будем искать в виде

$$\varphi_l = \sum_{i=1}^4 \varphi_l^i H_i, \quad (5)$$

где

$$H_1 = H(C_r - \beta C_p), \quad H_2 = H(C_r) - H_1, \quad H_3 = H(C_r) - H_4, \\ H_4 = H(-C_r - \beta C_p), \quad \beta = \sqrt{1 - R_1^2 / r^2}, \quad C_p = \sqrt{C^2 - C_z^2},$$

$H(x) = \frac{|x| + x}{2x}$  – стандартная функция Хевисайда;

$$\varphi_l^i = \sum_{k=1}^N \varphi_l^{i,k},$$

$$\varphi_l^{i,1} = a_1^i + a_2^i C^2 + a_3^i \varepsilon_l + a_4^i C_r + a_5^i C_r C^2 + a_6^i C_r \varepsilon_l, \text{ и т.д.}$$

То есть, функции  $\varphi_l^{i,1}$  (первое приближение) содержат моменты, входящие в функцию Чепмена – Энскога, что обеспечивает переход решения в газодинамический режим, а функции  $\varphi_l^{i,2}$  и т.д. учитывают моменты, получающиеся при подстановке предыдущих в левую часть кинетического уравнения.

Коэффициенты  $a_j^i$  определяются из системы дифференциальных уравнений, для составления которой, согласно основной идее метода полупространственных моментов, кинетическое уравнение (2) следует последовательно умножить на все входящие в (5) моменты, в частности, в первом приближении на

$$H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l), \quad C^2 H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l), \quad \varepsilon_l H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l),$$

$$C_r H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l), \quad C_r C^2 H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l), \quad C_r \varepsilon_l H_i \exp(-C^2 - \varepsilon_l)$$

и проинтегрировать по всему пространству скоростей и просуммировать по всем  $\varepsilon_l$ .

Искомый поток тепла определяется соотношением

$$q = \sum_l \int V_r \left( \frac{mV^2}{2} + \varepsilon_l \right) f_l^0 \varphi_l d^3V$$

и может быть представлен в виде

$$q = n_0 \sqrt{\frac{2k^3 T_0^3}{m}} Q,$$

где

$$Q = \frac{2}{\pi^{3/2} \Theta} \sum_l \int C_r (C^2 + \varepsilon_l) \varphi_l |_{r=R_k} \exp(-C^2 - \varepsilon_l) d^3C - \text{обезразмеренное значение потока}$$

тепла.

Определенный интерес представляет рассмотрение цилиндров достаточно большого радиуса, т.е. когда  $R_1 \gg 1$  и  $R_2 - R_1 \gg 1$ . В рассматриваемом пределе система моментных уравнений допускает аналитическое решение и поток тепла можно представить в виде

$$Q = \frac{3}{8} \frac{(3 + 2G)F_1}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} + C_t \lambda \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \frac{R_1 \Delta T}{r T_0}, \quad (6)$$

где

$$\lambda = \frac{l\sqrt{\pi}}{2},$$

$C_t$  – коэффициент скачка температуры, определение которого является самостоятельной проблемой и может служить критерием точности предложенного метода к решению кинетического уравнения. В частности, с учетом первых шести моментов, для конкретных газов получаем  $C_{t(N_2)} = 2.88518$ ,  $C_{t(CO_2)} = 2.52708$ ,  $C_{t(SO_2)} = 2.55949$ ,  $C_{t(\text{воздух})} = 2.97294$ . Заметим, что указанный подход в случае атомарного газа дает значение  $C_t = 2.20507$ , которое менее чем на 0.006% отличается от аналитического решения [11].

Значения обезразмеренного потока тепла при фиксированных  $R_1$  и  $R_2$  для конкретных газов, полученные при условии чисто диффузного отражения молекул газа от поверхности каждого из цилиндров, представлены в таблицах. Характеристики столкновительных параметров для конкретных газов взяты из [12].

Заметим, что при  $R_1 \gg 1$  задача сводится к плоской геометрии, и совпадает с результатами, полученными в работе [13]. При этом погрешность результатов, полученных в рамках изложенного подхода к решению кинетического уравнения уже в первом приближении, не превышает 0.4% во всем диапазоне числа Кнудсена.

Таблица 1 – Зависимость значений обезразмеренного потока тепла от соотношения между радиусами цилиндров ( $N_2$ :  $F_1 = 1,96$ ,  $Z = 5,08$ ,  $G = 1$ )

$R_1$	$R_1/R_2$						
	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
0,01	0.843630	0.844187	0.844578	0.845049	0.845370	0.845779	0.845997
0,1	0.814446	0.828376	0.830424	0.834229	0.837617	0.841199	0.843345
0,5	0.631149	0.749899	0.770896	0.788290	0.803735	0.821030	0.831604
1	0.469179	0.637985	0.691304	0.734309	0.763782	0.796582	0.817167
2	0.310733	0.470897	0.550753	0.637991	0.693961	0.751765	0,789603
3	0.220475	0.367848	0.450041	0.558325	0.635648	0.712817	0.764231
4	0.173276	0.300531	0.378453	0.493921	0.586095	0.678917	0.741109
5	0.142588	0.253619	0.325817	0.441776	0.543424	0.649053	0.720041
6	0.121083	0.219206	0.285746	0.399086	0.506315	0.622400	0.700775
7	0.105190	0.192938	0.254315	0.363662	0.473782	0.598341	0.683063
8	0.092974	0.172251	0.229043	0.333871	0.445056	0.537673	0.666697
9	0.083294	0.155548	0.208301	0.308507	0.419531	0.556282	0.651492
10	0.075435	0.141786	0.190979	0.286674	0.396714	0.537674	0.637295
50	0.015778	0.031153	0.043981	0.074338	0.123976	0.233132	0.363051
100	0.007932	0.015765	0.022404	0.038595	0.066602	0.136532	0.238767

Таблица 2 – Зависимость значений безразмерного потока тепла от соотношения между радиусами цилиндров ( $\text{CO}_2$ :  $F_1 = 1,629$ ,  $Z = 7$ ,  $G = 1,412$ )

$R_1$	$R_1/R_2$						
	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0.957113	0.958940	0.959735	0.960622	0.961201	0.961813	0.962126
0,1	0.906422	0.930928	0.936513	0.944169	0.950017	0.955550	0.958602
0,5	0.666925	0.811872	0.844761	0.876610	0.902232	0.928225	0.943071
1	0.480970	0.671708	0.738644	0.802046	0.847739	0.895626	0.924127
2	0.301781	0.481712	0.571727	0.679257	0.756253	0.836968	0.888320
3	0.218287	0.370906	0.459857	0.584670	0.683050	0.786888	0.855680
4	0.170632	0.300456	0.382863	0.511336	0.622917	0.743917	0.826141
5	0.139945	0.252139	0.327352	0.453525	0.572490	0.706536	0.799377
6	0.118571	0.217066	0.285651	0.407062	0.529574	0.673558	0.775028
7	0.102841	0.190495	0.253258	0.369026	0.492581	0.644113	0.752752
8	0.090787	0.169685	0.227403	0.337375	0.460373	0.617555	0.732257
9	0.081256	0.152956	0.206306	0.310656	0.432080	0.593398	0.713299
10	0.073534	0.139219	0.188771	0.287815	0.407038	0.571275	0.695670
50	0.015294	0.030248	0.042773	0.072663	0.122119	0.234194	0.374061
100	0.007682	0.015284	0.021739	0.037540	0.065077	0.135041	0.240576

Таблица 3 – Зависимость значений безразмерного потока тепла от соотношения между радиусами цилиндров ( $\text{SO}_2$ :  $F_1 = 1,5838$ ,  $Z = 25$ ,  $G = 3,6124$ )

$R_1$	$R_1/R_2$						
	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
0,01	1.577033	1.578716	1.579607	1.580644	1.581347	1.582211	1.582669
0,1	1.508229	1.543521	1.549237	1.558083	1.565431	1.572946	1.577335
0,5	1.127200	1.368742	1.419143	1.461659	1.495845	1.532152	1.553754
1	0.817162	1.138874	1.250569	1.348357	1.413796	1.482754	1.524785
2	0.513999	0.819170	0.971446	1.150217	1.270706	1.392252	1.469534
3	0.372031	0.631340	0.782051	0.992375	1.152494	1.313656	1.418693
4	0.290896	0.511676	0.651448	0.868696	1.053615	1.245417	1.372385
5	0.238624	0.429531	0.557206	0.770845	0.969828	1.185521	1.330223
6	0.202204	0.369872	0.486373	0.692098	0.898021	1.132293	1.291713
7	0.175396	0.324654	0.431324	0.627596	0.835872	1.084481	1.256358
8	0.154848	0.289232	0.387370	0.573903	0.781607	1.041119	1.223721
9	0.138600	0.260079	0.351490	0.528565	0.733853	1.001499	1.193447
10	0.125433	0.237356	0.321662	0.489796	0.691524	0.965068	1.165224
50	0.026092	0.051613	0.072978	0.123928	0.208121	0.398433	0.634992
100	0.018212	0.026081	0.037097	0.064049	0.110986	0.230053	0.409182

Таблица 4 – Зависимость значений безразмерного потока тепла от соотношения между радиусами цилиндров (воздух:  $F_1 = 1,9843$ ,  $Z = 25$ ,  $G = 1,1799$ )

$R_1$	$R_1/R_2$						
	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
0,01	0.894485	0.894956	0.895334	0.895797	0.896115	0.896535	0.896761
0,1	0.865155	0.879161	0.881013	0.884714	0.888109	0.891768	0.893989
0,5	0.674613	0.798701	0.820125	0.837409	0.853006	0.870746	0.881714

Продолжение таблицы 4							
1	0.503689	0.681602	0.737214	0.781346	0.811419	0.845218	0.866595
2	0.325261	0.505259	0.589356	0.680485	0.738421	0.798309	0.837706
3	0.238116	0.395717	0.482790	0.596613	0.677233	0.757477	0.811092
4	0.187340	0.323838	0.406737	0.528601	0.625122	0.721902	0.786823
5	0.154267	0.273601	0.350647	0.473407	0.580177	0.690540	0.764702
6	0.131063	0.236672	0.307843	0.428132	0.541035	0.662538	0.744467
7	0.113900	0.208441	0.274206	0.390497	0.506675	0.637248	0.725868
8	0.100700	0.186184	0.247119	0.358800	0.476302	0.614190	0.708679
9	0.090233	0.153365	0.224861	0.331779	0.449282	0.593003	0.692709
10	0.081735	0.153365	0.206255	0.308490	0.425106	0.573412	0.677794
50	0.017117	0.033785	0.047678	0.080544	0.133982	0.250809	0.388748
100	0.008606	0.017103	0.024301	0.041839	0.072118	0.147404	0.256708

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коленчиц, О.А. Тепловая аккомодация систем газ – твердое тело [Текст] / О.А. Коленчиц. – Минск: Наука и техника, 1977. – 381 с.
2. Кошмаров, Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа [Текст] / Ю.А. Кошмаров, Ю.А. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
3. Борисов, С.Ф. Взаимодействие газов с поверхностью твердых тел. [Текст] / С.Ф. Борисов, Н.Ф. Балахонов, В.А. Губанов. - М.: Наука, 1988. – 354 с.
4. Lees, L. Kinetic theory description of conductive heat transfer from a fine wire [Текст] / L. Lees., Liu Chung-Yen // Phys. Fluids. 1962. V.5, №5. P. 1137 – 1148.
5. Cerciniani, C. Variational approach to rarefied flows in cylindrical and spherical geometry [Текст] / C. Cerciniani, C.D. Pagani // Rarefied Gas Dynamics. 1967. V.2. P.555 – 573.
6. Bassanini, P. Influence of the accommodation coefficient on the heat transfer in a rarefied gas [Текст] / P. Bassanini, C. Cerciniani, C.D. Pagani // J. Heat Mass Transfer. 1968. V. 11. № 9. P.1359 – 1369.
7. Савков, С.А. К вопросу о вычислении потока тепла между коаксиальными цилиндрами при произвольных числах Кнудсена [Текст] / С.А.Савков, А.А. Юшканов // Журнал Технической Физики. 2000. Т. 70. Вып. 11. С. 9 – 14.
8. Алешин, П.С. О решении кинетического уравнения в задаче вычисления потока тепла между коаксиальными цилиндрами [Текст] / П.С. Алешин, С.А. Савков // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. №.8. С. 1495 – 1504.
9. Hanson, F.B. Kinetic models for gases with internal structure [Текст] / F.B. Hanson, T.F. Morse // Physics Fluids. 1967. V.10. N. 2. P. 345 – 353.
10. Wan Chang, C.S. [Текст] / C.S. Wan Chang, G.E. Uhlenbeck, J. Boer // Studies in Statistical Mechanics. – Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1964.
11. Латышев, А.В. Применение метода Кейза к решению линеаризованного кинетического БГК уравнения в задаче о температурном скачке [Текст] / А.В. Латышев // Прикладная математика и механика. 1990. Т. 54. Вып. 4. С. 581-586.
12. Pazooki, N. Heat transfer in a rarefied polyatomic gas – II. Sphere [Текст] / N. Pazooki, S.K. Loyalka // Heat Mass Transfer. 1988. V. 31. N. 5. P. 977 – 985.
13. Савков, С.А. О решении кинетического уравнения при вычислении потока тепла в многоатомных газах [Текст] / С.А. Савков, Е.Ю. Тюлькина // Журнал Технической Физики. 2008. Т.78. В.7. С.16-20

### **Савков Сергей Анатольевич**

Орловский государственный университет, г. Орел

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теоретическая физика и математическое моделирование»

Тел. (4862) 73-56-81

E-mail: [studtis@yandex.ru](mailto:studtis@yandex.ru)

### **Тюлькина Елена Юрьевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Ассистент кафедры «Высшая математика»

Тел. (4862) 42-06-91

E-mail: [anel2702@orel.ru](mailto:anel2702@orel.ru)

В.Я. ВАРГАШКИН

## КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТИ ВСЕЛЕННОЙ

*Проанализирована статистика изменения распределения квазаров по небесной сфере в зависимости от их красного смещения. Показано, что изменение статистики обусловлено наличием в наблюдаемой части Вселенной выделенного направления. Измерены координаты дипольного момента в разложении статистик по сферическим функциям. На основании измерений вычислены координаты выделенного направления.*

*The statistics of change of distribution of quasars on heavenly sphere depending on their red displacement is analysed. It is shown that statistics change is caused by availability in an observable part of the Universe of the allocated direction. The dipole moment coordinates are measured in decomposition the statistican on spherical functions. On the basis of measurements coordinates of the allocated direction are calculated.*

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Крупнейшую к настоящему времени базу данных, включающей описание квазаров, активных галактических ядер и лацертид содержит каталог обсерватории Сен-Мишель французского Высокого Прованса [1]. В двенадцатом издании этого каталога приведены характеристики более чем ста восьми тысяч объектов. Издание, однако, не содержит сведений о собственном движении квазизвездных объектов, поскольку при наблюдениях с расстояний порядка гигапарсек собственные движения объектов измерить не удалось.

Наиболее точные астрометрические измерения были выполнены консорциумом Европейского Космического Агентства в ходе работы спутника «Гиппарх» с 1989 по 1993 гг. [2] Погрешность измерений координат, параллаксов и собственного движения составляла 6...20 тысячных долей угловой секунды. Однако в ходе более чем трехлетней работы спутника наблюдениям подвергся лишь один квазар, и вопрос о собственном движении квазаров остался открытым.

Наиболее ранними прямыми результатами измерения собственного движения квазаров явились данные, полученные Д.-С.Мак-Милланом [3] с использованием радиоинтерферометрии с широко разнесенными базами. В его работе представлено распределение собственных движений квазаров по небесной сфере. В ходе наблюдений с были прямо измерены собственные движения квазаров, достигавшие 35 тысячных долей угловой секунды. Анализ распределения векторов скоростей собственного движения, полученного Д.-С.Мак-Милланом, свидетельствует о том, что распределение его направлений по небесной сфере носит неслучайный характер. На небесной сфере выделяются области типа радиантов и антирадиантов, из которых преимущественно исходит или в которые сходится видимый поток квазаров, а также области преимущественно однонаправленного собственного движения квазаров в видимом потоке. Близкие по полученному выводу результаты были получены О.Титовым [4]

Можно предположить, что видимое перемещение квазаров из областей дивергенции в области конвергенции должно отразиться на их количествах в тех или иных областях на карте расположения ныне открытых квазаров.

Анализ базы данных [1], однако, показывает, что обнаружение квазаров на небесной сфере велось крайне неравномерно. Так, на небесной сфере выделяется синусоидальная светлая область, в которой обнаруженные квазары практически отсутствуют. На эту область проецируется ребро Нашей Галактики, создающей паразитную засветку и препятствующую процессу обнаружения. На небесной сфере выделяются также пятна и полосы – данные отдельных экспериментов, в ходе которых в целях обнаружения квазаров детально

просматривались отдельные, относительно небольшие, участки неба. Поэтому непосредственный анализ частот распределения квазаров по участкам небесной сферы мог бы привести к неверному выводу о том, что видимые потоки квазаров следуют из областей, закрытых Млечным Путем в области, детально обследованные в поисках квазаров.

Вследствие этого для обнаружения выделенных направлений Вселенной, по отношению к которым группируются участки расходимости и сходимости видимого потоков квазаров на небесной сфере, анализу были подвергнуты регрессионные зависимости, характеризующие изменение относительных частот распределения квазаров по небесной сфере в зависимости от их красного смещения.

## **2 ОСОБЕННОСТИ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВАЗАРОВ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ**

Для дальнейших расчетов небесная сфера была разбита на 480 участков одинаковой площади. При этом окружность небесного экватора оказалась разбитой на 24 отрезка, что, таким образом, соответствовало интервалу разбиения по прямому восхождению в один угловой час дуги окружности. Дуга полуокружность небесного меридиана была разбита на 20 отрезков переменной длины для удовлетворения требованию равновеликости образованных в ходе разбиения сферических прямоугольников.

В среднем на каждый такой прямоугольник пришлось по 225 квазаров. Дальнейшее увеличение числа участков разбиения небесной сферы было признано нецелесообразным из-за роста влияния на результаты дальнейшего анализа хвоста распределения количества квазаров по  $z$  ввиду малости процентной доли квазаров, приходящейся на интервал значений красных смещений, превышающих 2,5.

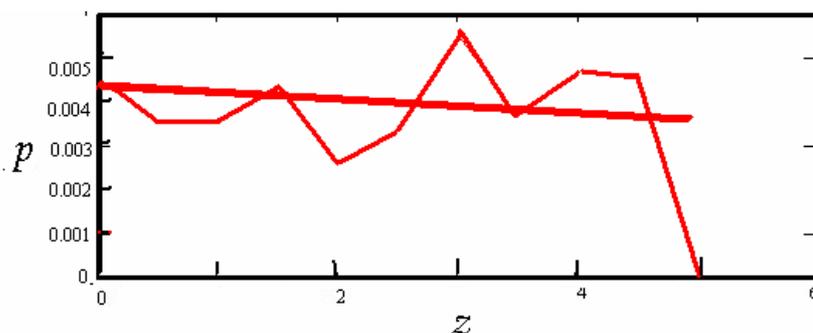


Рисунок 1 – Типичный вид гистограммы распределения квазаров по значениям красного смещения  $z$  для выборок по различным направлениям на небесной сфере

При этом для каждого участка строилась гистограмма, которая аппроксимировалась прямолинейной регрессионной зависимостью. Типичный вид такой гистограммы представлен на рисунке 1. График типичной гистограммы содержит два участка. На начальном участке, с относительно малыми значениями  $z$ , линия графика испытывает колебания плотности вероятности  $p$  по оси  $z$ . На конечном участке, с относительно большими значениями  $z$ , происходит падение линии гистограммы до нуля и совмещение ее с осью абсцисс. Падение обусловлено тем, что уже при  $z > 4$ , количества обнаруженных квазаров оказываются меньшими количества участков разбиения небесной сферы, вследствие чего типичная плотность вероятности обнаружения квазара в пределах такого участка на конце типичной же гистограммы оказывается нулевой.

Поведение гистограмм в поле графиков плотность вероятности  $p$  – красное смещение  $z$  может быть интерпретировано следующим образом. Предположим, что собственные движения квазаров по небесной сфере на каком-либо ее участке отсутствуют, и их смещение в пространстве является чисто радиальным. Тогда с течением времени квазары будут удаляться от наблюдателя, т.е. будет происходить рост  $z$ , но с ростом  $z$  абсолютное количество обнаруженных квазаров в соответствии с гистограммой рис.1 падает.

Относительная доля квазаров с текущим значением  $z$  на текущем же участке небесной сферы в отношении общего их числа с таким же значением  $z$  по всей небесной сфере в условиях роста  $z$  будет испытывать случайные колебания около некоторого среднего относительного значения с последующим падением этой доли к оси  $z$ , как это было показано в пояснении к графику типичной гистограммы рис.1. Аналогичным образом будет вести себя гистограмма также в случае наличия у квазаров их видимого собственного движения при случайном распределении его направления между квазарами в пределах текущего участка небесной сферы.

Если квазары обладают видимым собственным движением, имеющим неслучайное преимущественное направление в пределах нескольких соседних участков небесной сферы, это будет приводить к видимому перемещению квазаров из одних участков небесной сферы в другие через некоторое количество смежных участков транзитного движения. При этом с ростом  $z$  относительная доля квазаров с текущим значением  $z$  в отношении к общему их числу с этим же значением  $z$  по всей небесной сфере будет либо систематически уменьшаться на одних участках небесной сферы, т.е. на участках расходимости видимого потока, либо систематически увеличиваться на других участках, т.е. на участках сходимости видимого потока, либо оставаться неизменной в пределах участков транзитного движения.

На участках расходимости гистограмма будет обладать аномально крутым падением линии регрессии в сравнении с типичной гистограммой. На участках сходимости будет наблюдаться аномальная пологость линии регрессии или даже ее подъем от оси  $z$ . На участках транзитного перемещения квазаров будет реализовываться распределение квазаров с типичной гистограммой, поскольку выбывшие с этих участков квазары будут замещаться вновь поступившими.

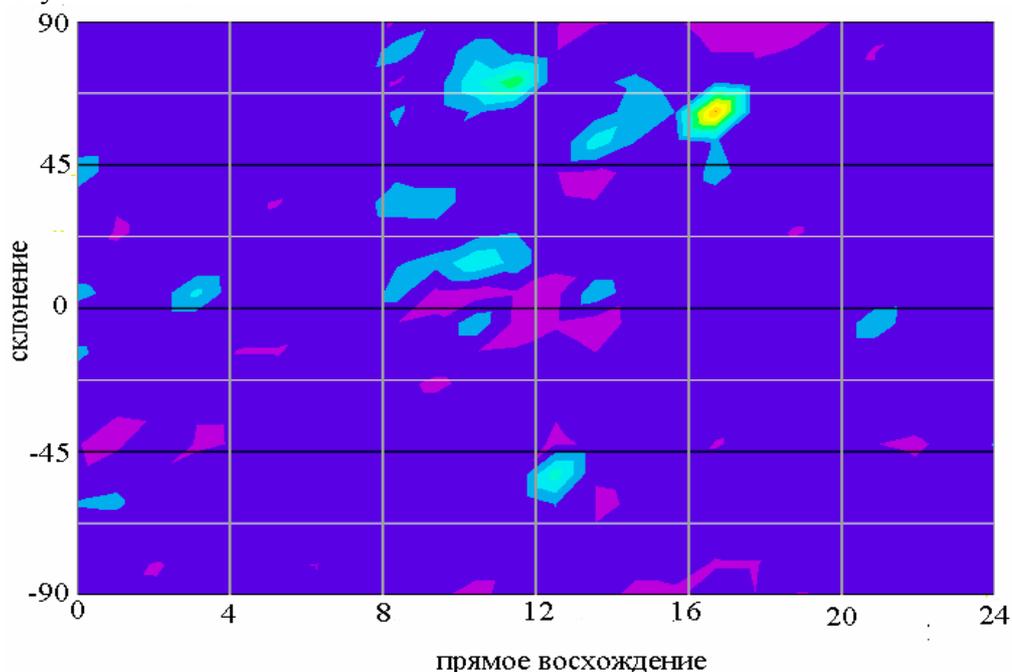


Рисунок 2 – Распределение углового коэффициента регрессии по небесной сфере

На рисунке 2 представлено распределение углового коэффициента наклона линии регрессии по небесной сфере. Для выявления систематичности угловой коэффициент наклона прямой регрессии, аппроксимирующей гистограмму распределения квазаров по значениям красного смещения  $z$ , как функцию  $f(\theta; \varphi)$  угловых координат  $\theta$  и  $\varphi$  сферической координатной системы следует разложить в ряд по сферическим функциям. Неслучайный характер распределения углового коэффициента наклона при этом обуславливает значимость вклада в разложение амплитуд мультипольных сферических функций, в первом приближении амплитуд дипольной сферической функции, в сравнении с амплитудой сферической функции нулевого порядка.

Выполненные рассуждения не позволяют сделать априорных выводов о том, какие значения углов наклона линии регрессии следует отнести к типичным, и где пролегают границы типичных линий с аномально крутыми и аномально пологими линиями регрессии. Можно лишь предположить, что при отсутствии статистически значимых преимущественных направлений видимого движения аномальности угла наклона прямой регрессии следует считать случайными выбросами, случайным же образом распределенными по небесной сфере. В противном случае, т.е. при выделенности видимых направлений собственного движения квазаров, участки небесной сферы с аномальностями угла наклона линии регрессии, окажутся распределенными по небу с некоторой систематичностью.

### 3 ОЦЕНКА ВЫДЕЛЕННОГО НАПРАВЛЕНИЯ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА И ЕГО СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ

Для анализа характерной направленности нерадиальной компоненты собственного годичного движения квазаров полученные поля  $f(\theta; \varphi)$  оценок отклонения (см.: рисунки 7–9), распределенные на сфере  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ;  $0 \leq \theta < \pi$ , были разложены по сферическим функциям вида:

$$F(\theta; \varphi) = \sum_{h=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} a_{h;0} (P_h \cos \theta) + \sum_{m=1}^h P_h^m(\cos \theta) (a_{h;m} \cos m\varphi + b_{h;m} \sin m\varphi) \right], \quad (1)$$

где амплитуды гармонических составляющих вычисляются по формулам:

$$a_{h;m} = \frac{2h+1}{2\pi} \frac{(h-m)!}{(h+m)!} \int_0^{2\pi} d\varphi' \cos m\varphi' \int_0^{\pi} f(\theta'; \varphi') P_h^m(\cos \theta') \sin \varphi' d\theta', \quad (2)$$

$$b_{h;m} = \frac{2h+1}{2\pi} \frac{(h-m)!}{(h+m)!} \int_0^{2\pi} d\varphi' \sin m\varphi' \int_0^{\pi} f(\theta'; \varphi') P_h^m(\cos \theta') \sin \varphi' d\theta', \quad (3)$$

$P_n^m(\cos \theta)$  - присоединённые сферические функции.

Сохраняя в (1) первые два члена разложения по  $h$ :

$$F(\theta; \varphi) \approx \frac{1}{2} a_{0;0} P_0^0(\cos \theta) + \frac{1}{2} a_{1;0} P_1^0(\cos \theta) + P_1^1(\cos \theta) (a_{1;1} \cos \varphi + b_{1;1} \sin \varphi), \quad (4)$$

вычисляя входящую в (4) функцию  $P_h^m(\cos \theta)$  при  $m \neq 0$ :

$$P_1^1(\cos \theta) = \sin \theta, \quad (5)$$

а также вычисляя с помощью зональных сферических функций  $P_0(\cos \theta)$  прочие из входящих в (3) присоединенных сферических функции  $P_h^0(\cos \theta)$ :

$$P_0(\cos \theta) = P_0^0(\cos \theta) = 1, \quad (6) \quad P_1^0(\cos \theta) = P_1^0(\cos \theta) = \cos \theta, \quad (7)$$

и подставляя (5) – (7) в (4), получаем в левой части разложение  $f(\theta; \varphi)$  по гармоническим составляющим  $\theta$ :

$$F(\theta; \varphi) \approx \frac{1}{2} a_{0;0} + \frac{1}{2} a_{1;0} \cos \theta + \sin \theta (a_{1;1} \cos \varphi + b_{1;1} \sin \varphi) \quad (8)$$

где, с учетом (5) – (7)

$$a_{0;0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \sin \varphi' \int_0^{\pi} f(\theta'; \varphi') d\theta', \quad (9)$$

$$a_{1;0} = \frac{3}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \sin \varphi' \int_0^{\pi} f(\theta'; \varphi') \cos \theta' d\theta', \quad (10)$$

$$a_{1;1} = \frac{3}{8\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \cos 2\varphi' \int_0^{\pi} f(\theta'; \varphi') \sin \theta' d\theta', \quad (11)$$

$$b_{1;1} = \frac{3}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \sin^2 \varphi' \int_0^\pi f(\theta'; \varphi') \sin \theta' d\theta' . \quad (12)$$

Так как потенциал мультиполя порядка  $j$ , помещенного в начало отсчета, составляет:

$$\Phi_j(\mathbf{r}) = (-1)^j (\mathbf{p}_j \nabla) (\mathbf{p}_{j-1} \nabla) \dots (\mathbf{p}_1 \nabla) \varphi_0(\mathbf{r}) , \quad (13)$$

где  $\varphi_0(\mathbf{r})$  – потенциал точечного заряда:

$$\varphi_0(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} , \quad (14)$$

то потенциал диполя, как мультиполя первого порядка, равен:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\mathbf{r}) &= (-1)(\mathbf{p} \nabla) \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = -\frac{xp_x}{x^2 + y^2 + z^2} - \frac{yp_y}{x^2 + y^2 + z^2} - \frac{zp_z}{x^2 + y^2 + z^2} = \\ &= -\frac{xp_x}{|\mathbf{r}|^2} - \frac{yp_y}{|\mathbf{r}|^2} - \frac{zp_z}{|\mathbf{r}|^2} = -\frac{p_x}{|\mathbf{r}|} \sin \theta \cos \varphi - \frac{p_y}{|\mathbf{r}|} \sin \theta \sin \varphi - \frac{p_z}{|\mathbf{r}|} \cos \varphi \end{aligned} \quad (15)$$

Сравнивая (15) с (8), убеждаемся в том, что координаты вектора диполя выражаются через амплитуды членов в сферическом разложении следующим образом:

$$\frac{p_x}{|\mathbf{r}|} = -a_{1;1} \quad (16) \quad \frac{p_y}{|\mathbf{r}|} = -b_{1;1} \quad (17) \quad \frac{p_z}{|\mathbf{r}|} = -\frac{1}{2} a_{1;0} , \quad (18)$$

Тогда сферические координаты вектора дипольного момента приобретают вид:

$$\frac{|\mathbf{p}|}{|\mathbf{r}|} = \sqrt{a_{11}^2 + b_{11}^2 + \frac{1}{4} a_{10}^2} \quad (19)$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{a_{10}}{2 \cdot \sqrt{a_{11}^2 + b_{11}^2 + \frac{1}{4} a_{10}^2}} \right) , \quad (20) \quad \varphi = \arccos \left[ \frac{a_{11}}{\sqrt{\left( a_{11}^2 + b_{11}^2 + \frac{1}{4} a_{10}^2 \right)^2 - \frac{a_{10}^2}{4}}} \right] . \quad (21)$$

На рисунке 3 представлен график разложения (8) углового коэффициента наклона гистограммы на монопольную и дипольную составляющие ряда сферических функций. Более ярко окрашенным областям соответствуют участки сходимости видимого потока квазаров на небесной сфере. Более темным участкам соответствуют участки видимой расходимости.

Вычисленные интервальные оценки искоемых величин (20) – (21), полученные при различных способах подготовки выборки составляют соответственно:  $\theta = 110 \dots 123^\circ$   $\varphi = 270,34 \dots 270,36^\circ$ , что близко по направлению к центру Нашей Галактики. Ширина интервальных оценок, вычисленных для девяностопятипроцентной доверительной вероятности, составляет 11 % по углу  $\theta$  и 0,02 % по углу  $\varphi$  в долях соответствующих оценок математического ожидания. Достигнутая относительно слабая зависимость результата от способа подготовки выборки, характеризуемая относительно малыми доверительными интервалами оценок угловых координат дипольного момента позволяет считать полученные оценки статистически значимыми.

Следует также заметить, что отношение оценок модуля  $|\mathbf{p}|$  (19) дипольного момента и члена  $\frac{1}{2} a_{00}$  нулевого порядка разложения углового коэффициента наклона гистограмм по сферическим гармоникам оказалось не меньшим 2,30, что также свидетельствует о том, что вклад дипольных членов в общее разложение является статистически значимым.

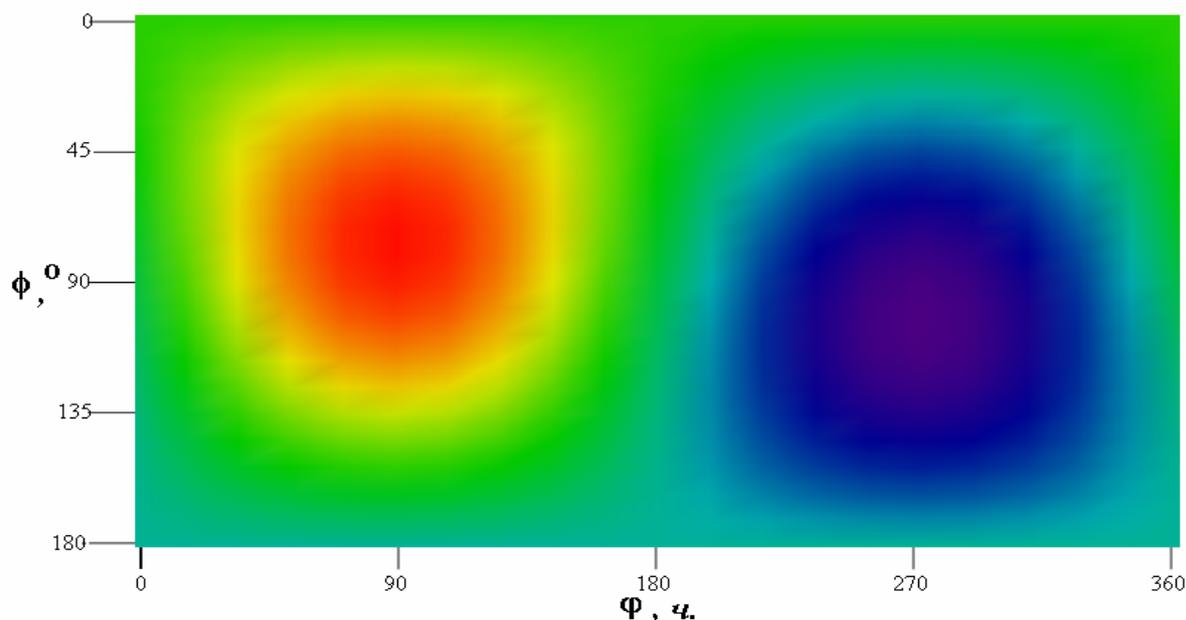


Рисунок 3.—Разложение углового коэффициента регрессии на монопольную и дипольную составляющие.

#### 4 ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ. НАЛИЧИЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ЗНАЧИМОГО ВЫДЕЛЕННОГО НАПРАВЛЕНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Удовлетворительная близость представленных в настоящей работе результатов выводам других авторов [3] – [5] позволяет судить о наличии во Вселенной выделенного направления, а также о статистической значимости оценки координат этого направления.

При этом возникает вопрос о природе видимого движения квазаров по небесной сфере, в частности вопрос о том, является ли такое движение пекулярным, носит ли оно космологическую природу, обусловлено каким-либо эффектом геометрии пространства-времени, или же оно обусловлено чисто оптическими факторами типа искривления световых лучей, например, воздействием тяготения каких-либо гравитационных линз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M.-P. Veron-Cetty and P. Veron. A Catalogue of Quasars and Active Nuclei: 12-th Edition // ESO Scientific Report.—№ 19.—2006.
2. The Hipparcos and Tycho Catalogues: Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission. A Collaboration Between the European Space Agency and the FAST, NDAC, TDAC and INCA Consortia and the Hipparcos Industrial Consortium led by Matra Marconi Space and Alenia Spazio.—European Space Agency, SP 1200.—June 1997.
3. MacMillan D.S. Quasar Apparent Proper Motion Observed by Geodetic VLBI Networks // Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA / J. D. Romney & M. J. Reid (eds.).—ASP Conference Series, 2003; arXiv:astro-ph/0309826v1 30 Sep, 2003.
4. Titov O. The apparent proper motions of reference radio sources // Материалы конференции FERT-2007, 24 – 30 сентября 2007 г., Москва-Фрязино.—<http://hypercomplex.xpsweb.com/video/04titov-2007Fr.wmv>
5. Павлов Д.Г. Гипотеза о финслеровой природе «Оси Зла» // Российская гравитационная конференция.—Москва, РУДН.—2007.

**Варгашкин Владимир Яковлевич**

Институт физики, Лондон, Великобритания

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика»

Тел.: (4862) 41-98-89

## ЭФФЕКТЫ ЭНЕРГООБМЕНА ПРИ РЕКОМБИНАЦИИ АТОМОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

*Обнаружены протекающие на границе твердых тел и газов гетерогенные химические процессы, в которых хемосорбированные реагенты не участвуют в химических превращениях, но, являясь возникшими в ходе реакции центрами катализа, ускоряют химические реакции.*

*Heterogeneous chemical processes in which chemical adsorption reagents do not participate in chemical transformations are found out proceeding on border of firm bodies and gases, but, being the centers which have arisen during reaction catalis, accelerate chemical reactions.*

При изучении механизмов гетерогенных химических реакций, протекающих на границе твердых тел и газовых смесей, используют методы спектроскопии. При этом одновременно определяют скорость реакции и спектр поверхностных соединений, возникающих при хемосорбции реагентов и протекании реакции. Принято считать, что симбатные изменения скорости реакции  $J$  и концентрации  $N$  одного из наблюдаемых поверхностных комплексов, образованного хемосорбированными частицами газа, свидетельствует об его участии в общей последовательности получения продукта в качестве промежуточного вещества реакции. Однако, эта корреляция не может быть истолкована однозначно в тех случаях, когда частицы газа могут находиться на поверхности катализатора в разных состояниях, отличающихся реакционной активностью, и возможны разные маршруты протекания реакции. При этом другая интерпретация симбатного хода кривых  $J(x)$  и  $N(x)$ , где  $x$  – физический параметр, состоит в том, что появление данных хемосорбированных комплексов изменяет состояние поверхности благоприятным для протекания реакции образом, вследствие чего возрастает эффективность катализатора. Например, хемосорбированные частицы, не принимая участия в химических превращениях, могут быть активными центрами катализа, участвуя в процессах энергообмена и стабилизации высокореакционных интермедиатов или молекул продукта реакции.

В настоящей работе изложены экспериментальные результаты, которые свидетельствуют о возможности каталитического ускорения хемосорбированными реагентами гетерогенных химических реакций.

При исследовании элементарных химических процессов на поверхности твердых тел, помещенных в активную газовую среду, применены методы релаксационных измерений [1, 2]. Они позволяют контролировать участие в поверхностных химических превращениях свободных, хемосорбированных и физически адсорбированных частиц газа. Одновременно регистрируются кинетические кривые концентрации адсорбированных частиц реагирующих веществ  $N(t)$ , динамический эффект реакции (ДЭР)  $F(t) = GJ(t)$  и интенсивность поверхностной хемилюминесценции  $I(t) = \eta J(t)$ , где  $G$  и  $\eta$  – коэффициенты;  $J$  – скорость гетерогенной реакции. Используется три типа модуляции потока активных частиц газа. В первом случае поток активных частиц газа включается на время  $\sim 10^2$  с, за которое успевает установиться адсорбционное равновесие на поверхности катализатора, затем этот поток выключается. Во втором случае изучается взаимодействие с твердым телом движущихся вместе с газом-носителем «пакетов» активных частиц газа, за время прохождения которых через реактор с образцом  $\sim 1$  с состояние поверхности не успевает измениться; на периодически следующие «пакеты» накладывается стационарный поток активных частиц, включаемый на время  $\sim 10^2$  с. В третьем случае скорость газовой струи резко увеличивается, что позволяет улучшить временное разрешение метода более чем на порядок (до 10 мс) и исследовать кинетику гетерогенного химического процесса на интервале 0,1 с.

Газ при давлении  $P = 30$  Па непрерывно прокачивали через стеклянную вакуумную камеру (прочный реактор), стенки которой можно нагревать до температуры 500 К. Адсорбционные измерения выполняли с помощью пьезорезонансных кварцевых весов чувствительностью  $4,4 \cdot 10^{-9}$  г. Исследуемое мелкодисперсное вещество в виде спиртовой суспензии наносили слоем  $d \approx 0,1$  мм на обе поверхности пьезоэлемента; о концентрации хемосорбированных частиц  $N$  судили по уменьшению собственной частоты пьезовесов  $f$ , которую измеряли частотомером ЧЗ-54. Температурный коэффициент частоты кварцевого резонатора равнялся  $1 \text{ Гц} \cdot \text{К}^{-1}$ , при этом погрешность измерений, обусловленная нагревом пьезодатчика протекающей на его поверхности реакцией, не превышала 5 %. Установлено, что адсорбционная способность собственной поверхности пьезодатчика незначительна. При измерении ДЭР применяли автоматические весы с магнитным подвесом. Исследуемое вещество в виде спиртовой суспензии наносили слоем  $d \approx 0,1$  мм на верхнюю поверхность подложки, прикрепленной к подвижной части весов с помощью кварцевой нити. Чувствительность весов, откалиброванных с помощью груза массой 1 мг, составила  $2,5 \cdot 10^{-6}$  г при постоянной времени  $10^{-1}$  с. Отношение сигнал/шум было равным от 10 до  $10^3$ , при этом погрешность измерений не превышала 10 %. Пьезодатчик и чашечку весов помещали в проточный реактор.

Изучены элементарные стадии гетерогенных химических реакций  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$  и  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ . В качестве катализатора использовали ультрадисперсный порошок меди, имеющий средний диаметр частиц сферической формы 100 нм; мелкодисперсные люминофоры  $\text{ZnS} - \text{Cu}$ ,  $\text{ZnS} - \text{Tm}$ ,  $\text{CaO} - \text{Mn}$ , с удельной поверхностью  $\sim 1 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$  и алюмоплатиновый катализатор  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,6% Pt) с удельной поверхностью  $\sim 10 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ . Применяли спектрально чистые водород и углекислый газ. Углекислый газ получали разложением при нагревании в вакууме  $\text{CaCO}_3$  и осушали, пропуская через колонку с силикагелем. Использовали генератор водорода ГВЧ-6; водород, чистотой 99,995 %, пропускали через колонку с силикагелем. Диссоциацию молекул газа ( $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$ ;  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$ ) осуществляли с помощью высокочастотных электрических разрядов в газе между электродами, находящимися на расстоянии (0,4 - 1) м от реактора.

Два одинаковых высокочастотных генератора возбуждали газовые разряды в присоединенных к реактору разрядных трубках. Каждый из двух разрядов был стационарным, импульсным, либо комбинированным: стационарно-импульсным. Длительность каждого импульса 1 с, частота их следования  $0,02 \text{ с}^{-1}$  или  $0,04 \text{ с}^{-1}$ . Импульсный разряд периодически увеличивал концентрацию активных частиц газа  $n$  на величину  $\Delta n$  (создавал «пакеты» частиц). Каждый разряд экранировался и был независим от другого. Регулируемая мощность разрядов составляла величину (10 - 70) Вт [2]. Измеренная методом термозонда стационарная концентрация активных частиц газа в реакторе над поверхностью образца в зависимости от мощности разряда была равна  $n = (10^{13} - 10^{14}) \text{ см}^{-3}$ . В других опытах с помощью высокочастотного генератора с регулируемой мощностью (0,1 - 1) кВт в газе возбуждали импульсный разряд длительностью 0,1 с. Одновременно в разрядную трубку с помощью электромагнитного клапана за время 0,6 с вводили порцию молекулярного газа из вспомогательного объема с давлением  $10^4$  Па. Благодаря этому формировался «пакет» активных частиц газа с плотностью  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и временем прохождения через реактор 0,1 с. Возникающие в зоне любого из используемых разрядов колебательно- и электронно-возбужденные молекулы в процессе диффузии в реактор испытывали не менее  $10^3$  столкновений с молекулами газовой среды и, благодаря этому, теряли избыток энергии [3]. Заряженные частицы не поступали в реактор (проверено в опытах). Излучение разряда поглощалось рогом Вуда. Из разрядных трубок в реактор поступала смесь молекул и радикалов, находящихся в основных электронных и колебательных состояниях.

В режиме импульсной модуляции потока активных частиц газа концентрацию поступающих в реактор атомов  $\text{H}$  определяли в относительных единицах по интенсивности импульсного свечения голубой ( $\lambda = 487 \text{ нм}$ ) линии атомов водорода в плазме разряда. Линию

в спектре свечения атомов Н выделяли с помощью монохроматора УМ-2. Интенсивность свечения атомов водорода в плазме  $I_g$  и интенсивность  $I$  радикалорекombинационной люминесценции (РРЛ) кристаллофосфоров, возникающей в ходе гетерогенной реакции, измеряли с помощью двух фотоумножителей ФЭУ-85А. Сила тока каждого ФЭУ, пропорциональная величине  $I_g$  или  $I$ , с помощью двух аналого-цифровых преобразователей измерялась через каждые 12 мкс; полученные численные данные поступали в ПЭВМ, что позволяло одновременно измерять кинетические кривые  $I(t)$ ,  $I_g(t)$ , где  $t$  – время.

Для очистки поверхности образцов от адсорбционных загрязнений (молекул спирта, воды и воздуха) они выдерживались 1,5 ч в атомно-молекулярной смеси водорода при температуре 350 К. С помощью пьезорезонансных кварцевых весов осуществляли контроль за распылением поверхности катализатора атомами Н. После резкого снижения скорости распыления тренировку образцов атомарным водородом прекращали. В случае медного образца наблюдалось восстановление поверхностных оксидов атомами Н и изменение черного цвета порошка на красный, при этом величина динамического эффекта реакции  $H+H \rightarrow H_2$  возрастала на порядок. Замена водорода углекислым газом осуществлялась за время 2 с при сохранении режима непрерывной прокачки газа через реактор. После смены одного газа другим реактор 5 минут промывали потоком молекул, затем включали высокочастотный разряд в газе.

После включения стационарного потока активных частиц газа заполнение поверхности всех изученных катализаторов хемосорбированными атомами водорода или частицами СО и О происходит относительно медленно с характерным временем релаксации  $\tau \approx (10 - 100)$  с. В случае протекания гетерогенных реакций  $CO + O \rightarrow CO_2$  и  $H + H \rightarrow H_2$  по ударному механизму Или – Ридила (ИР) или адсорбционному механизму Ленгмюра – Хиншельвуда (ЛХ) должно выполняться условие [4]:  $\tau < N_0 (0,25nv\gamma)^{-1}$ , где  $N_0$  – концентрация центров адсорбции;  $v$  – скорость активных частиц газа, сталкивающихся с поверхностью;  $\gamma$  – коэффициент их гетерогенной рекомбинации. В условиях опытов имеем:  $\gamma = (10^{-3} - 10^{-1})$ ,  $N_0 \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$  [4]. Отсюда получаем:  $\tau < (10^{-4} - 10^{-1})$  с, что противоречит опыту. Следовательно механизмы ИР и ЛХ нельзя использовать при описании изучаемых реакций.

Форма кинетических кривых  $F(t)$  и  $I(t)$  зависит от концентрации  $n$  активных частиц в газовой среде и их природы. В случае, когда  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  после включения стационарного разряда величины  $F$  и  $I$  скачком возрастают и далее практически не меняются со временем, что соответствует независимости скорости реакции от концентрации хемосорбированных реагентов. Этот результат можно объяснить участием в реакции частиц, хемосорбированных на гипотетических активных центрах, концентрация которых лежит за пределами чувствительности адсорбционных измерений. Однако, вероятность того, что на поверхности всех изученных катализаторов одновременно и для реакции  $H + H \rightarrow H_2$  и для реакции  $CO + O \rightarrow CO_2$  имеются такие весьма немногочисленные обладающие очень высокой активностью центры катализа, пренебрежимо мала. При этом сечения химических превращений (по ударному механизму ИР) на таких центрах должны превышать физически оправданные значения. Поэтому изложенные результаты можно трактовать как следствие протекания реакции по механизму рекомбинации частиц, захваченных в преадсорбционное состояние (precursor state), которое можно считать также состоянием физической адсорбции. Отметим, что аналогичные данные о независимости скорости реакции  $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$  на платине от степени покрытия поверхности молекулярным кислородом ( $0,4 \leq \theta \leq 1$ ) объяснены участием в реакции слабо связанных с поверхностью (преадсорбированных) молекул СО, образующих двумерный газ (на платине хемосорбция СО осуществляется через преадсорбционное состояние).

Во всех исследованных случаях после выключения разряда скорость реакции скачком падает до нуля и наблюдается десорбция газа. Эти данные означают, что вклад химических превращений в слое хемосорбированных частиц (механизм ЛХ) в значение скорости гетерогенной реакции пренебрежимо мал.

В случае реакции  $H + H \rightarrow H_2$  уменьшение концентрации атомов Н в газовой среде до значений  $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  приводит к изменению формы кинетических кривых  $F(t)$  и  $I(t)$ , полученных после включения стационарного разряда: на них появляются начальные участки

роста величин  $F$  и  $I$  приблизительно по линейному закону. Для иллюстрации влияния концентрации активных частиц в газовой среде на форму кинетических кривых  $F(t)$  рассмотрим результаты, полученные с использованием техники импульсной периодической модуляции величины  $n$  в случае рекомбинации атомов  $H$  на поверхности медного катализатора. В стационарных условиях с ростом концентрации атомов водорода в газовой среде концентрация хемосорбированных атомов  $N^*(n)$  и величина ДЭР  $F^*(n)$  монотонно (симбатно) возрастают, при этом зависимость  $F^*(N^*)$  близка к линейной:  $F^* \approx kN^*$ , где  $k$  – коэффициент; здесь и далее звездочка обозначает стационарные значения физических величин. Форма этих кривых не меняется после включения импульсного источника периодически следующих «пакетов» атомов водорода, увеличивающих концентрацию атомов  $n$  в газе на величину  $\Delta n$ . При прохождении «пакета» радикалов через реактор на кривых  $N(t)$  и  $F(t)$  появляются пики с длительностью у основания  $3\tau$  (рис. 1, вставка). Амплитуда периодически возникающих пиков ДЭР  $F_m = F(n + \Delta n)$  после включения стационарного разряда возрастает и затем не меняется (кривая 1), при этом она не зависит от концентрации хемосорбированных атомов  $N$ , которая возрастает со временем (кривая 2). После выключения стационарного разряда величина  $F_m$  принимает прежнее значение и наблюдается десорбция атомов  $H$ .

Форма кинетической (непрерывной) кривой  $F(t)$ , полученной после включения стационарного разряда, зависит от величины  $n$  концентрации атомов в газовой среде: при  $n \lesssim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  на кривой  $F(t)$  наблюдается участок роста, синхронного с ростом концентрации хемосорбированных атомов (рис.1, кривая 3); при  $n \gtrsim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  кривые  $F(t)$  имеют прямоугольную форму.

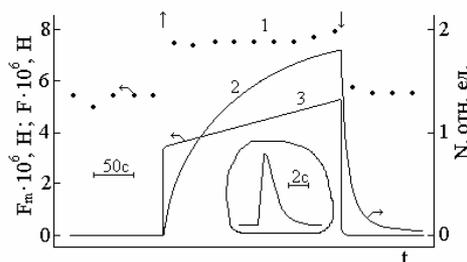
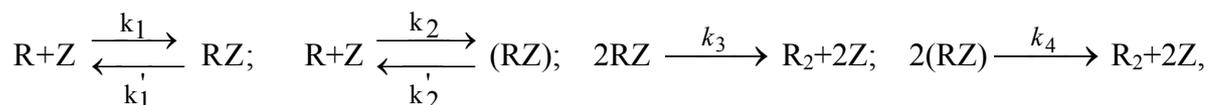


Рисунок. 1 – Кинетические кривые величин  $F_m$  (1, 4, 5),  $F$  (3, 4', 5') и  $N$  (2) в случае взаимодействия «пакетов» атомов водорода с поверхностью меди (1, 2, 3) до и после включения ( $\uparrow$ ) и выключения ( $\downarrow$ ) стационарного потока атомов  $H$ .  $T = 293 \text{ К}$ . 1, 2, 3 –  $n = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $n^{-1}\Delta n = 3$ ; Вставка – форма пика ДЭР.

В случае фиксированной концентрации  $\Delta n$  атомов в «пакетах» при увеличении стационарной концентрации атомов  $n$  (вследствие чего меняется величина  $N$ ) приращения величины ДЭР в импульсах  $\Delta F = F(n + \Delta n) - F(n)$  не возрастают, при этом значения  $\Delta F$  не зависят от концентрации хемосорбированных атомов  $N$ . Если менять величину  $\Delta n$  при постоянных значениях  $n$  (и  $N$ ), то величина  $\Delta F$  возрастает с ростом концентрации  $\Delta n$  атомов в «пакете». В случае взаимодействия «пакетов» атомов  $H$  с люминофором  $ZnS-Cu$  установлены аналогичные закономерности.

Изменения со временем величин  $N$  и  $F$  (кривые 2 и 3) попробуем объяснить протеканием гетерогенной реакции  $H + H \rightarrow H_2$  по механизму участия хемосорбированных атомов водорода в актах химических превращений (механизмы ИР и ЛХ). Тогда имеем:  $F = GJ = \alpha nN + \beta N^2$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты. В этом случае изменение в несколько раз концентрации атомов  $H$  в газовой среде не должно приводить к нарушению симбатного хода кривых  $F(t)$  и  $N(t)$ , что противоречит опыту (сравни кривые 1, 2 и 3). Кроме того, не выполняется критерий участия хемосорбированных атомов в химических превращениях [12]:  $\tau < N_0 (0,25 \text{ пв}\gamma)^{-1}$ . Поэтому предлагается следующая модель реакции:



где  $Z$  – центр адсорбции;  $(RZ)$  – хемосорбированный атом;  $RZ$  – атом, захваченный в преадсорбционное состояние.

Постоянство величин  $F_m$  после включения стационарного разряда (кривая 1) свидетельствует о том, что участок роста на зависимости  $F(t)$  не связан с неконтролируемым изменением состояния поверхности со временем, поэтому этот рост может быть обусловлен только одной причиной: увеличением со временем параметра  $k_3$  вследствие роста концентрации хемосорбированных атомов. Это увеличение, вероятно, обусловлено участием хемосорбированных атомов в стабилизации образующихся молекул вследствие энергообмена в слое адсорбированных частиц.

В случае протекания гетерогенной реакции  $CO + O \rightarrow CO_2$  на поверхности люминофора  $ZnS - Cu$  при температуре  $T = 295$  К на кинетику РРЛ оказывает влияние значительная, частично необратимая в этих условиях хемосорбция атомов  $O$  и молекул  $CO$ . Эти результаты не могут быть объяснены участием в гетерогенной реакции хемосорбированных частиц. Используем модель, в которой скорость реакции определяет рекомбинация преадсорбированных частиц  $CO$  и  $O$  друг с другом. Для кривых 2 и 2' выполняется равенство  $I_m \Gamma^{-1} \approx n^{-1}(n + \Delta n)$ , что соответствует выполнению условия  $J = \eta^{-1} \cdot I \approx 0,5 \cdot k_1 \cdot N_0$ . Это максимально возможное значение скорости реакции, поэтому при уменьшении температуры и прочих равных условиях скорость реакции возрастает только за счет увеличения сечения захвата свободных частиц  $CO$  и  $O$  в преадсорбционное состояние  $\sigma$ . Эффект связан с увеличением степени покрытия поверхности хемосорбированными частицами при понижении температуры и обусловлен участием хемосорбированных частиц в отводе избыточной энергии при стабилизации на поверхности преадсорбированных частиц по схеме:  $R+Z+(RZ) \rightarrow RZ+(RZ)$ .

Известно, что хемосорбция молекул газа на поверхности твердых тел осуществляется через преадсорбционное состояние. При увеличении давления газовой смеси концентрация молекул, находящихся в преадсорбционном состоянии, растет, при этом вероятность химических превращений с их участием (когда это возможно) возрастает. Однако, поскольку в случае «больших» давлений [ $P = (10^2 - 10^5)$  Па] релаксационные методы исследований поверхностных химических реакций не развиты, участие преадсорбированных молекул в гетерогенных химических процессах остается неопределенным. Полученные в настоящей работе результаты служат основанием для изучения моделей гетерогенных реакций, в которых учитывается участие преадсорбированных молекул в актах химических превращений. Можно предположить, что такие модели адекватны реальным химическим процессам.

При температуре  $T = (293 - 500)$  К и концентрации активных частиц газа  $n = (10^{13} - 10^{15})$  см<sup>-3</sup> гетерогенные реакции  $H + H \rightarrow H_2$  и  $CO + O \rightarrow CO_2$  на поверхности твердых тел ( $Cu, Pt, ZnS, CaO$ ) протекают по механизму рекомбинации физически адсорбированных (преадсорбированных) частиц. Сечения гетерогенных химических превращений по ударному механизму Или – Ридила (ИР) имеют пренебрежимо малые значения, а химические превращения в слое хемосорбированных частиц (адсорбционный механизм Ленгмюра – Хиншельвуда) не дают заметного вклада в значение скорости гетерогенной реакции. В зависимости от концентрации активных частиц в газовой среде, температуры и природы катализатора величину скорости этих реакций лимитируют разные стадии: стадия захвата налетающих из газовой среды частиц в преадсорбционное состояние, либо стадия рекомбинации преадсорбционных частиц друг с другом. Наиболее отчетливо признаки

участия преадсорбированных частиц в гетерогенных химических превращениях проявляются в случае «больших» концентраций этих частиц в газовой среде ( $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Эти результаты установлены разными независимыми методами.

В случае «малых» концентраций атомов водорода в газовой среде ( $n \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) наблюдались симбатные кинетические изменения концентрации хемосорбированных атомов водорода и скорости гетерогенной реакции  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$ , не связанные с участием хемосорбированных атомов  $\text{H}$  в химических превращениях, а обусловленные тем, что хемосорбция атомарного водорода изменяет состояние поверхности, вследствие чего растет ее каталитическая активность. Механизм этого роста, вероятно, заключается в стабилизации образующихся молекул водорода вследствие процессов энергообмена в ходе реакции по схеме:  $\text{HZ} + \text{+HZ} + (\text{HZ}) \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{Z} + (\text{HZ})$ . Обнаружено аналогичное увеличение каталитической активности поверхности сульфида цинка по отношению к гетерогенной реакции  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$  вследствие хемосорбции частиц  $\text{CO}$  и  $\text{O}$ , обусловленное ростом сечения захвата реагирующих на поверхности частиц в состояние преадсорбции по схеме:  $\text{R} + \text{Z} + (\text{RZ}) \rightarrow \text{RZ} + (\text{RZ})$ .

В стационарных условиях с ростом концентрации атомов водорода в газовой среде скорость их гетерогенной рекомбинации на поверхности твердых тел возрастает приблизительно по линейному закону. Эта зависимость  $J^*(n) \sim n$  неоднократно наблюдалась в ранее выполненных исследованиях и служила основанием для заключения о протекании реакции по ударному механизму ИР [5]. Ошибочность такого вывода обусловлена неразвитостью методов наблюдений, основанных на использовании нестационарных режимов протекания гетерогенных реакций. Из результатов экспериментов вытекает, что правильная интерпретация механизмов гетерогенных реакций  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$ ,  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ ,  $\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2$  невозможна без привлечения данных, полученных с использованием релаксационных методов исследований.

Установленная в опытах для стационарных условий линейная связь между скоростью гетерогенной реакции  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$  и концентрацией хемосорбированных атомов водорода ( $J^* = kN^*$ , где  $k$  - коэффициент) отнюдь не означает, что хемосорбированные атомы  $\text{H}$  участвуют в химических превращениях, ответственных за величину скорости гетерогенной реакции. Этот результат свидетельствует о том, что при изучении любых гетерогенных химических реакций использование методов, позволяющих охарактеризовать состав поверхности образца непосредственно в реакционных условиях, и установление корреляции концентрации поверхностных частиц с каталитической активностью поверхности не дает однозначной информации об участии этих хемосорбированных частиц в последовательности химических превращений, обеспечивающих образование молекул продукта в ходе реакции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матьшак, В.А. Возможности ИК – спектроскопии *in situ* в исследовании механизма гетерогенно – каталитической реакции. // VI Российская конференция "Механизмы каталитических реакций." Тезисы докладов. Новосибирск: Изд – во Института катализа СО АН РФ. 2002. Т. 1. С. 182.
2. Харламов, В.Ф. Метод определения состояний молекул и радикалов газа, участвующих в гетерогенных химических превращениях// В.Ф. Харламов, Т.С. Рогожина, А.В. Бармин и др Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 13. С. 67.
3. Каллир, А. Обмен энергией между химическими частицами. // А. Каллир, Ламберт Дж. Возбужденные частицы в химической кинетике. М.: Мир. 1973. С. 214.
4. Харламов, В.Ф. Рекомбинация атомов на поверхности твердых тел и сопутствующие эффекты. Томск: изд-во ТГУ. 1994. 207 с.
5. Лавренко, В.А. Рекомбинация атомов водорода на поверхностях твердых тел. Киев: Наукова думка. 1973. 204с.

### **Рогожина Татьяна Сергеевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»  
Тел. (4862) 419889  
E-mail: tatiana1703t@mail.ru

Л. Ю. ФРОЛЕНКОВА

## ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Проведен анализ экспериментальных и теоретических методов оценки адгезионной прочности. На основании градиентной модели упругой среды и допущения о том, что в изотермическом процессе изменение свободной энергии равно изменению упругой энергии, произошедшему при вступлении тел в адгезионный контакт, разработана методика расчета энергии адгезии, позволяющая получить удовлетворительное соответствие рассчитанных с ее помощью данных с результатами других расчетов, а также опытными данными.*

*The analysis of experimental and theoretical methods of an estimation of adhesion strength is carried out. On the basis gradient model of the elastic medium and an assumption that in isothermal process change of free energy equals change of elastic energy, which is the result of entering of solid into adhesive contact. The analysis of energy of the adhesion is developed. By means of this analysis is calculated the adhesive behavior, which satisfied the results of other calculations and the experimental data.*

### ВВЕДЕНИЕ

Многослойные структуры широко применяются в различных областях техники. Они представляет собой совокупность чередующихся слоев разных материалов, например, керамика и металл. К слоям композиционного материала предъявляются различные требования. Одним из них является высокая степень их взаимной адгезии.

Адгезия – это явление возникновения связей между поверхностными слоями разнородных тел [1]. Количественно адгезия характеризуется удельной работой или силой, затрачиваемой на разделение тел. Работа или сила рассчитываются на единицу площади соприкасающихся поверхностей и зависят от того, как производится их разделение: сдвигом вдоль поверхности раздела или отрывом в направлении, перпендикулярном к поверхности. В зависимости от прочности адгезионного соединения общеприняты следующие виды разрушений: адгезионное (адгезив целиком отделяется от субстрата, рисунок 1, а); когезионное (разрыв происходит по массиву адгезива или субстрата, рисунок 1, а, б); смешанное (происходит частичное отделение адгезива от субстрата, частичное разрушение субстрата и частичное разрушение адгезива, рисунок 1, г).

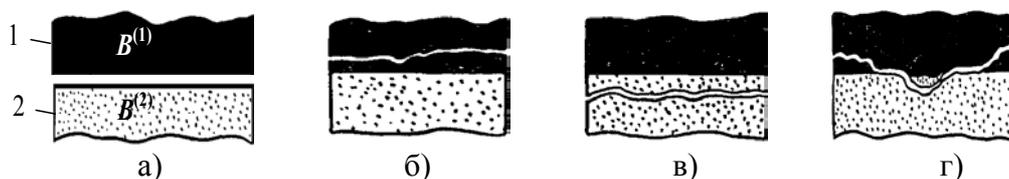


Рисунок 1 – Виды разрушений адгезионных соединений:

1 – адгезив ( $B^{(1)}$ ); 2 – субстрат ( $B^{(2)}$ ); а – адгезионное; б, в – когезионное; г – смешанное

Из-за разнообразия причин вызывающих адгезию, сложности проведения "чистого" физического эксперимента по ее оценке тем или иным способом, разброс результатов оценки степени адгезии весьма широк. Тем не менее, в качественном отношении эти результаты могут быть признаны верными, так как в основе их получения лежат гипотезы, правильно отражающие физическую реальность.

В настоящей работе представлены разнообразные как экспериментальные, так и теоретические способы определения степени адгезии [2, 3], основанные на учете разных причин ее появления и проявления.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

Все методы определения адгезионной прочности покрытий можно условно разбить на прямые и косвенные [4].

Прямые методы основаны на определении приложенного внешнего усилия, под действием которого в адгезионном соединении возникают нормальные и тангенциальные (касательные) напряжения, приводящие к разрушению соединения. Эти методы испытаний можно классифицировать по способу нарушения адгезионной связи:

- неравномерный отрыв (рисунок 2 а) – усилие прикладывается не к центру соединения, а к одному его краю, поэтому связь нарушается постепенно;
- равномерный отрыв (рисунок 2 б) – усилие прикладывается к центру соединения, перпендикулярно плоскости контакта;
- сдвиг (рисунок 2 в) – касательные напряжения создают путем растяжения, либо под действием сжимающих нагрузок.

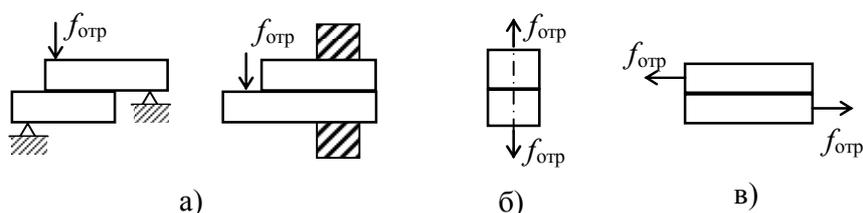


Рисунок 2 – Схемы испытаний:

а – неравномерный отрыв; б – равномерный отрыв; в – сдвиг

Однако не существует методов, при использовании которых напряжения распределялись бы действительно равномерно и представляли бы собой отрыв или сдвиг в чистом виде. В зависимости от метода испытания за меру адгезии могут быть приняты сила отрыва, энергия или время. Обычно сила отрыва  $F_{отр}$  рассчитывается на единицу площади минимального контакта:

$$F_{отр} = \frac{f_{отр}}{S_{нк}},$$

где  $f_{отр}$  – сила отрыва;

$S_{нк}$  – площадь номинального контакта.

Рассмотренные выше методы измерения адгезии характеризуются кратковременным приложением нагрузки. Это так называемые статические методы. Но помимо обычных статических испытаний в некоторых случаях проводят динамические измерения адгезии путем приложения знакопеременных циклически изменяющихся нагрузок, ударных и длительных статических нагрузок. Для динамических методов показателем прочности адгезионного соединения служит число циклов нагружения до разрушения.

Кроме прямых способов адгезию оценивают при помощи косвенных методов. В качестве параметров оценки используют величины, от которых зависит адгезия. Например, некоторые из косвенных методов заключаются в нанесении определенной массы адгезива и нахождение его доли, остающейся на поверхности субстрата.

Так же оценку адгезионных свойств поверхности можно провести на основании данных о значениях краевого угла смачивания [5]. Как и в случае смачивания, в процессе адгезии происходит уменьшение поверхностного натяжения соприкасающихся фаз. Исходя из условия равновесия границы  $G$  раздела трех фаз, одной из которых является газ (рисунок 3), нетрудно показать, что коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma_{12}$  связан с краевым углом смачивания  $\theta$  следующим выражением [5]:

$$\sigma_{12} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta}.$$

При этом работа адгезии [5]:

$$w_{12} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta}.$$

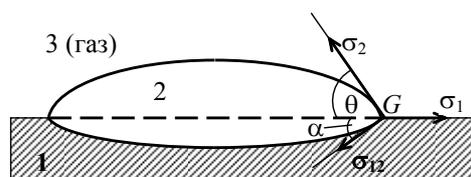


Рисунок 3 – Зависимость между краевым углом  $\theta$  и поверхностными натяжениями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{12}$

Во многих случаях проведение экспериментов по проверке прочности адгезии затруднено или невозможно. Поэтому необходимы теоретические методы ее расчета.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ АДГЕЗИИ

Электрическая природа адгезии была установлена экспериментально Дерягиным Б. В., и теоретически обоснована Лифшицем Е. М. [6]. Лифшиц и его последователи разработали метод расчета поверхностной энергии и энергии адгезии как изменение электрической энергии по отношению к бесконечной среде. Метод основан на идее о взаимодействии положительно заряженных ядер атомов и отрицательно заряженных электронов между собой и перекрестно с учетом характерных для этих взаимодействий эффектов. Теории, не учитывающие этого прямо, либо дополняют электрическую теорию (механическая, диффузионная), либо являются следствием электрической теории (адсорбционная, химическая).

Электрическая теория адгезии имеет наибольшую трудность при использовании для сред сложного химического состава из-за детального учета электрических взаимодействий, происходящих в этой среде, учитываемых в рамках согласно этой теории. В связи с этим внутренние реальные электрические силы предлагается моделировать внутренними феноменологическими силами, характерными для механики деформируемого твердого тела. В этом случае изменение свободной энергии деформируемого твердого тела в изотермическом обратимом процессе, которое рассчитывается в рамках электрической теории равно энергии упругих деформаций твердого тела. Предполагается также, что материал бесконечной среды однороден и изотропен, по аналогии с моделью "желе" в электрической теории. Это допущение позволяет существенно упростить математические выражения [6].

В изотермическом процессе процесс адгезии считается обратимым. Это допущение дает возможность оценить энергию адгезии  $F_a$  убылью свободной поверхностной энергии [7]:

$$F_a = W_p^{(1,2)} - W_p^{(1)} - W_p^{(2)},$$

где  $W_p^{(1,2)}$ ,  $W_p^{(1)}$ ,  $W_p^{(2)}$  – поверхностные энергии, приходящиеся на единицу площади поверхности  $S_0$ , после вступления  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  в адгезионный контакт и до него. В свою очередь поверхностная энергия  $W_p$  – это изменение свободной энергии тела в изотермическом обратимом процессе, следовательно, связанное с работой внутренних сил, произошедшее при образовании данного вида поверхности (поверхность контакта для  $W_p^{(1,2)}$  и свободная поверхность для  $W_p^{(k)}$ ,  $k = 1, 2$ ).

Считается, что тело, для которого вычисляется поверхностная энергия, полубесконечно, занимает область:  $0 \leq x_1 \leq +\infty$ ,  $-\infty \leq x_2$ ,  $x_3 \leq +\infty$ . Поверхностная энергия для таких тел определяется следующим выражением:

$$W_p = \int_0^{\infty} w(x) dx,$$

где  $x$  – координата, отсчитываемая от плоской поверхности тела в его глубину;

$w(x)$  – объемная плотность изменения внутренней энергии упругих деформаций, которая рассчитывается путем решения соответствующих задач о напряженно-деформированном состоянии полубесконечного тела  $B^{(k)}$ , а также сопряженной задачи для объединенного тела  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$ , когда на границе контакта выполняется требование не только непрерывности поля перемещений, но и его дифференцируемости по координате, нормальной к поверхности контакта.

Расчет энергии адгезии предлагается проводить по следующей формуле:

$$F_a = \int_{-\infty}^{+\infty} w^{(1,2)}(x) dx - \int_{-\infty}^0 w^{(1)}(x) dx - \int_0^{+\infty} w^{(2)}(x) dx,$$

где  $w^{(1)}(x)$ ,  $w^{(2)}(x)$ ,  $w^{(1,2)}(x)$  – объемные плотности изменения внутренней энергии упругих деформаций свободных от контакта тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  и, соответственно, слипшейся системы тел, сконцентрированная вблизи  $S_0$ .

### ВЫБОР ТЕОРИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ АДГЕЗИИ

Для расчета соответствующих распределений  $w$  теория упругости основана на следующих предположениях.

Классическая теория упругости не годится, так как не рассматривает поверхностные эффекты. Поэтому предлагается использовать градиентную модель упругой среды. Это можно сделать по следующим причинам.

Уравнения равновесия среды в рамках этих моделей, записанные в перемещениях, имеют порядок больший, чем классические, содержат малый параметр (дополнительный к классическим упругую константу) при старшей производной. Это является свидетельством возможности описывать пограничный слой.

В основу положена теория, изложенная в [8], которая основана на следующих допущениях.

1. Среда, из которой состоят тела, является сплошной.
2. Ее плотность  $\rho$  и температура  $T$  являются постоянными.

3. Подобно тому, как атомы и ионы в реальном твердом теле взаимодействуют с помощью дальнедействующих потенциальных сил, частицы сплошной среды также взаимодействуют с помощью дальнедействующих парных потенциальных сил. Потенциал взаимодействия пропорционален их объемам  $dV$  и  $dV_1$ . Коэффициент пропорциональности  $\Phi(\vec{R}_1 - \vec{R})$  определяется относительным положением частиц в текущей конфигурации, выбирается в форме потенциала Морзе [8]. Сила воздействия частицы  $dV_1$  на частицу  $dV$ :  $\vec{F} dV dV_1$ , определяется соотношением:

$$\vec{F} = -\nabla_{\vec{a}} \Phi = \vec{F}(\vec{a}) + \left( \nabla_{\vec{a}} \vec{F} \right)_{\Delta \vec{u}}^T \cdot \Delta \vec{u},$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона;

$\vec{u} = \vec{R} - \vec{r}$  – смещение частицы из отсчетного состояния в текущее;

$\vec{a} = \vec{r}_1 - \vec{r}$  – положение частицы  $dV_1$  относительно  $dV$  в отсчетном состоянии.

4. Относительное смещение частиц  $\Delta \vec{u}$  представлено в виде разложения в ряд Тейлора по внешним степеням вектора  $\vec{a}$ .

$$\Delta \vec{u} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \left[ \nabla_{\vec{r}}^{(m)} \vec{u} \right]^T \cdot \dots \cdot (\vec{a}^m),$$

где  $\nabla^m \vec{u} = \frac{d^m \vec{u}}{d\vec{r}^m}$  – градиент порядка  $m$  вектора  $\vec{u}$ ;

$\vec{a}^m$  – внешняя  $m$ -ная степень вектора  $\vec{a}$ ,  $m = 1, 2, \dots, \infty$ .

Потенциал  $d\varphi$  частицы  $dV$  относительно ее окружения в среде  $\Omega$  определяется формулой

$$d\varphi = \left[ \int_{\Omega} \Phi(\vec{R}_1 - \vec{R}) dV_1 \right] dV.$$

Следствием являются следующие равенства:

$$\delta w = \sum_{m=1}^{\infty} P^{(m)} \cdot \dots \cdot \delta \left( \nabla_{\vec{r}}^{(m)} \vec{u} \right)^T, \quad (1)$$

где  $P^{(m)} = P^{0(m)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \nabla_{\vec{r}}^{(m)} \vec{u} \right) \cdot \dots \cdot C^{(m,n)T}$  – тензор внутренних обобщенных напряжений; (2)

$$P^{0(m)} = \int_{\Omega} \left[ \vec{F}(\vec{a}) \vec{a}^m \right] dV_1 \quad \text{– тензор начальных напряжений;} \quad (3)$$

$$C^{(m,n)} = \frac{1}{m!n!} \int_{\Omega} \vec{a}^n \left( \nabla_{\vec{a}} \vec{F} \right) \vec{a}^m dV_1 \quad \text{– тензор, характеризующий механические свойства среды.} \quad (4)$$

Анализ выражений (1) – (4) дает основание для следующих выводов.

1. Бесконечная последовательность градиентов перемещений  $\left\{ \nabla_{\vec{r}}^{(m)} \vec{u} \right\}$  является характеристикой деформированного состояния в окрестности точки  $\vec{r}$ .

2. Обобщенными силами, которые совершают работу на них как на обобщенных перемещениях, являются элементы последовательности  $\left\{ P^{(m)} \right\}$  тензоров напряжений.

Уравнения движения и краевые условия для тела  $B$ , полученные на основании вариационного принципа Гамильтона с использованием выражений (1) – (4), имеют вид:

$$\nabla_{\vec{r}} \cdot \left( P^{(1)} - \nabla_{\vec{r}} \cdot \left( P^{(2)} - \dots \right) \right) + \vec{f} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}; \quad \vec{r} \in V \quad (5)$$

$$\vec{n} \cdot \left( P^{(1)} - \nabla_{\vec{r}} \cdot \left( P^{(2)} - \dots \right) \right) - \nabla_S \cdot \left( \vec{n} \cdot \left( P^{(2)} - \dots \right) \right) = \Pi^{(0)}; \quad \vec{r} \in S \quad (6)$$

$$\vec{n} \cdot \left( P^{(2)} - \nabla_{\vec{r}} \cdot \left( P^{(3)} - \dots \right) \right) - \nabla_S \cdot \left( \vec{n} \cdot \left( P^{(3)} - \dots \right) \right) = \Pi^{(1)}$$

.....

Дифференциальные уравнения как для внутренних точек – дифференциальная форма закона сохранения импульса, так и для граничных – краевые условия, имеют бесконечный порядок, количество краевых условий бесконечно.

Для решения конкретных задач в уравнения (5) и (6) необходимо подставить выражение (2), предварительно вычислив интегралы (3) и (4).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ

Выбранное выражение потенциала  $\Phi(a)$  имеет вид:

$$\Phi(a) = D \left( e^{-2\beta a} - 2e^{-\beta a} \right), \quad a = |\vec{a}|, \quad (7)$$

где  $D$  – параметр, определяющий энергию взаимодействия частиц;

$\beta$  – коэффициенты пропорциональности;

Определяющие потенциал (7) параметры  $D$  и  $\beta$  найдены методами физики твердого тела.

С учетом этого вычислены распределения  $P^{0(1)}$ ,  $P^{0(2)}$ ,  $C^{(1,1)}$ ,  $C^{(1,2)}$ ,  $C^{(2,2)}$  вблизи границы полубесконечного тела. На рисунке 4 показаны кривые распределения  $P^{0(1)}$ ,  $P^{0(2)}$ ,  $C^{(1,1)}$ ,  $C^{(1,2)}$ ,  $C^{(2,2)}$  для  $Cr$  (для других материалов эти кривые имеют аналогичный вид) при условии:

$$P^{0(1)} = const = 0, \quad P^{0(2)} = const, \quad C^{(1,1)} = const, \quad C^{(1,2)} = const = 0, \quad C^{(2,2)} = const; \quad (8)$$

$$P^{0(1)} = P^{0(1)}(x), P^{0(2)} = P^{0(2)}(x), C^{(1,1)} = C^{(1,1)}(x), C^{(1,2)} = C^{(1,2)}(x), C^{(2,2)} = C^{(2,2)}(x). \quad (9)$$

Для поиска распределения плотности свободной энергии по контактирующим телам  $w(x)$  сформулированы и решены задачи о напряженно-деформированном состоянии полубесконечного тела со свободной границей и системы двух таких тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  находящихся в состоянии адгезии. В обоих случаях внешнее воздействие отсутствует. Обе задачи являются одномерными.

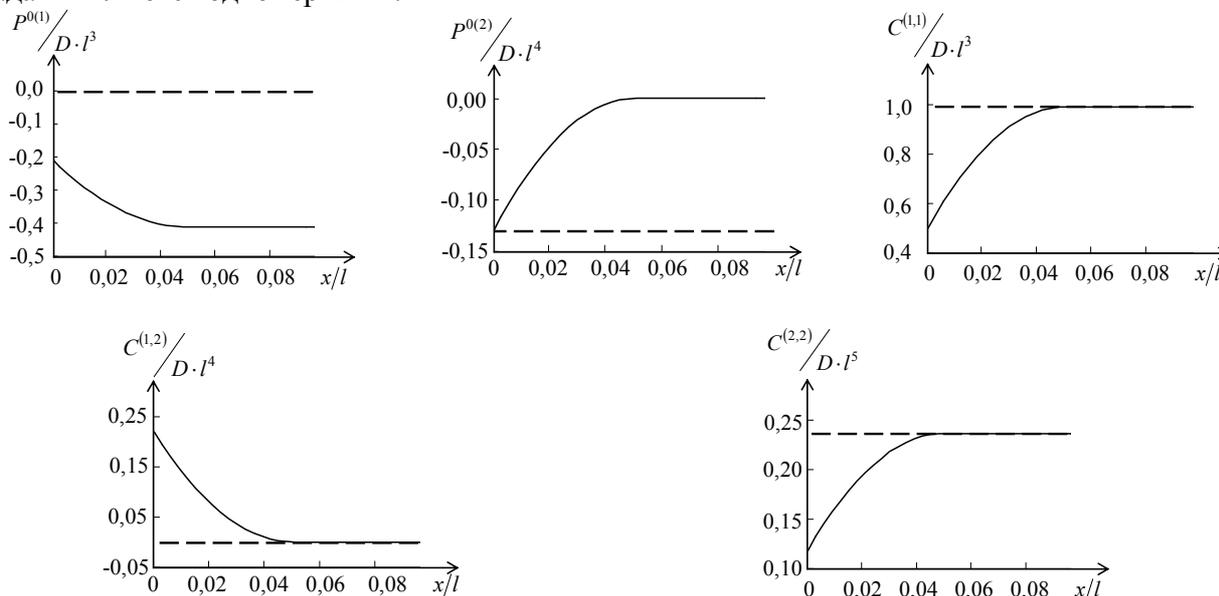


Рисунок 4 – Распределение механических характеристик вблизи поверхности твердого тела

При расчете поверхностной энергии выяснилось следующее.

Вблизи свободной поверхности, в случае, если не нарушается ее целостность, развиваются превышающие предел прочности, растягивающие материал напряжения  $\sigma(x)$ , приближенная оценка распределения которых определяется формулой:

$$\sigma(x) = P^{(1)} = \lambda \frac{du}{dx} = \frac{\pi_0}{b(2\mu + \lambda)} e^{-\frac{x}{b}}, \quad (10)$$

где  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе;

$$\pi_0 = P_{\infty}^{(0,2)}; \quad b = \sqrt{\frac{C_{\infty}^{(2,2)}}{C_{\infty}^{(1,1)}}}.$$

Напряжения быстро убывают по мере удаления от граничной поверхности. Их наличие приводит к появлению сети микротрещин глубиной  $h$ :

$$h = \begin{cases} b \ln \left( \frac{16 \nu}{3(1-\nu^2)} \right), & \text{если } \sigma(x) \geq \sigma_{\max} \\ 0, & \text{если } \sigma(x) < \sigma_{\max} \end{cases},$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

определяемой через предельное растягивающее напряжение  $\sigma_{\max}$  с применением равенства (10).

Раскол поверхностного слоя по такой микротрещине приводит к сосредоточению на ее берегах поверхностной энергии с той же плотностью  $W_p^0$ , что и плотность распределения поверхностной энергии у свободной границы. Предполагается, что поперечное сечение микротрещины – клин с углом раствора равным  $2\alpha$ . Этот угол определяется из

предположения о том, что упругая энергия, сосредоточенная на единице длины в области с сечением, совпадающим с сечением микротрещины, полностью распределяется на боковых сторонах микротрещины. Он вычисляется на основании формулы

$$\sin \alpha = \frac{1}{3} \left[ 3 - \frac{1}{2} e^{-\frac{2h}{b}} - e^{-\frac{h}{b}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{2h}{b}}}{\left(\frac{2h}{b}\right)} - \frac{1 - e^{-\frac{h}{b}}}{\left(\frac{h}{b}\right)} \right].$$

Край микротрещины свободен от напряжений. Напряжения, растягивающие материал вдоль граничной поверхности, перпендикулярные соседним микротрещинам, по мере удаления от них возрастают от нуля до значения, имеющего порядок предела прочности и не превышающего его. Значит, расстояние между ближайшими микротрещинами:  $h_s \approx 2b$ . В результате оказывается, что поверхность, концентрирующая возле себя энергию, увеличивается в  $\gamma$  раз:

$$\gamma = 2 \left( \frac{h}{b \cos \alpha} \right) + 1.$$

Таким образом, энергия, приведенная к единице площади боковой поверхности, вычисляется по формуле

$$W_p = \frac{3\gamma \pi_0^2}{2b(2\mu + \lambda)}.$$

Поверхностная энергия рассчитывалась в двух вариантах (см. рисунок 5):

- 1) когда расчет произведен с учетом постоянства всех характеристик упругости по (8) [9];
- 2) когда расчет произведен с учетом (9).

Результаты коррелируют с известными экспериментальными.

Полученные значения поверхностной энергии  $W_p$  позволили рассчитать энергию адгезии. Задача об адгезии рассматривается как сопряженная для полубесконечных тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$ , контактирующих вдоль плоскости  $x = 0$ . При этом на плоскости  $x = 0$ , выполняются условия непрерывности нормальных составляющих напряжений, характеризуемых тензорами  $P^{(1)}$  и  $P^{(2)}$ . Кроме того, выполняются отмеченные ранее кинематические условия сопряжения полей перемещений и их градиентов.

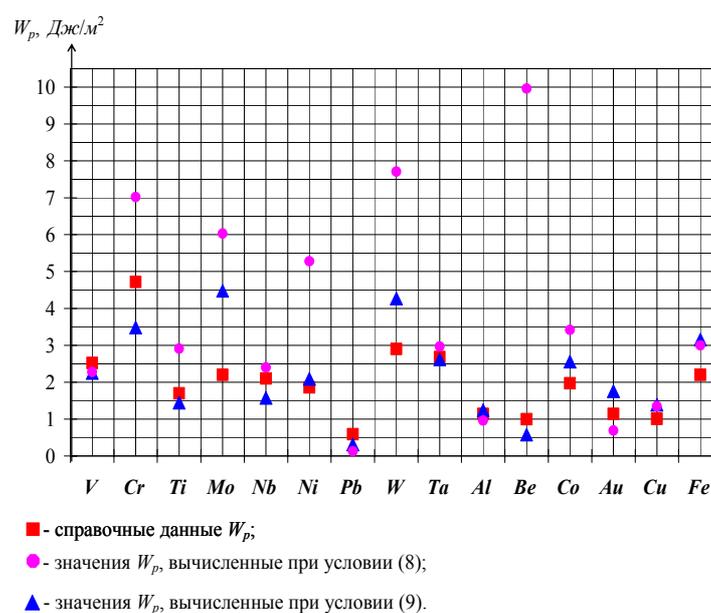


Рисунок 5 – Поверхностная энергия для ряда материалов

На рисунке 6, для некоторых систем, показаны результаты расчета энергии адгезии на

основании учета электрических взаимодействий и изменений упругих деформаций в рамках градиентной модели второго порядка.



Рисунок 6 – Энергия адгезии для некоторых систем

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические расчеты энергии адгезии, произведенные различными методами, близки по своим значениям и коррелируют между собой. Это дает основание для утверждения о том, что исходные предпосылки о замене расчета изменений свободной энергии, происходящих при образовании свободной поверхности упругих тел и вступлении их в адгезионный контакт, как изменение электрической энергии, на расчет тех же величин, как изменений упругой энергии, являются правильными. Кроме того, видно, что учет неоднородности механических свойств материалов вблизи поверхности контакта дает более точные результаты, как поверхностной энергии, так и энергии адгезии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел [Текст] / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. Л. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
2. Кротова, Н. А. О склеивании и прилипании [Текст] / Н. А. Кротова. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 167 с.
3. Шоркин, В. С. Расчет адгезионной прочности соединения твердых тел в рамках теории упругости [Текст] / В. С. Шоркин, Л. Ю. Фроленкова // Сборник трудов 47 Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". – Н.-Новгород, 2008. – С. 93 – 95.
4. Зимон, А. Д. Адгезия пленок и покрытий [Текст] / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. - 312 с.
5. Матюхин, С. И. Измерение краевого угла смачивания как метод исследования адгезионных свойств поверхности и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз [Текст] / С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы, 2003. – Т. 5. – № 2. – С. 216-220.
6. Вакилов, А. Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма [Текст] / А. Н. Вакилов, М. В. Мамонова, В. В. Прудников. // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39. – № 6. – С. 964 – 967..
8. Шоркин, В.С. Особенности упругости поверхностных слоев твердых тел [Текст] // Упругость и неупругость / Материалы Межд. н.симп. по пробл. мех. деформ. тел./ Под ред. Кийко И.А., Исраилова М.Ш., Бровко Г.Л.– М.: МГУ, 2001.– С. 453 – 454.
9. Витковский, И. В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкометаллического бланкета термоядерного реактора [Текст] / И. В. Витковский, А. Н. Конев, В. С. Шоркин, С. И. Якушина. // Журнал технической физики, 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С.28 – 33.

**Фроленкова Лариса Юрьевна**

Орловский государственный технический университет, г.Орел

Доцент кафедры «Физика»

Тел. (4862) 41-98-44

E-mail: Lara@ostu.ru



# **ТЕХНОЛОГИИ, ИНСТРУМЕНТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 621

Е.А. БЕЛКИН

## **СТОХАСТИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОРЕЛЬЕФА**

*Раскрыт вероятностный смысл понятия тензора кривизны. Дан алгоритм расчета условной вероятности формирования микрорельефа в окрестности данной точки. Определена вероятность соответствия геометрической модели микрорельефа заданной степени точности, в случае его формирования абразивным инструментом.*

*Problems of grinding of surfaces with cup wheels are discussed. Relation between roughness (arithmetic mean of profile deviation)  $R_{122}$ , tool pressure on machine able surface and grain size of abrasive wheel is derived.*

### **1 ВЕРОЯТНОСТНЫЙ СМЫСЛ МОДУЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОРЕЛЬЕФА**

Данные профилометрирования позволяют определить массив точек в пространственной системе координат, принадлежащей исследуемой поверхности микрорельефа. По этому массиву точек структурируется модульная геометрическая модель, восстанавливающая исходную поверхности в виде геометрических образов – различных типов соприкасающегося параболоида. Эти образы: плоскость, параболический цилиндр, гиперболический параболоид (седло), эллиптический параболоид – имеют относительно простое аналитическое задание в локальной системе пространственных координат, связанных с вершиной данного геометрического образа. Поэтому ими удобно оперировать в инженерных расчетах при решении задач теории формообразования.

Соприкасающийся параболоид в данной точке микрорельефа определяет естественную кривизну поверхности в смысле Римана-Кристоффеля. Первая и вторая квадратичные формы описываемой поверхности и параболоида одинаковы в данной точке соприкосновения. Отсюда следует равенство их нормальных кривизн и тензоров Римана-Кристоффеля в нулевом приближении [2].

Соприкасающийся параболоид воспроизводит форму поверхности микрорельефа в окрестности точки касания, во втором приближении, подобно тому, как касательная плоскость воспроизводит ее в первом приближении.

Исходная поверхность микрорельефа, с которой снимаются данные профилометрирования, аналитически не задана. Восстановление ее формы зависит от выбора шага по двум осям пространственной системы координат. Поэтому оценка вероятности описания формы поверхности микрорельефа в окрестности данной точки возможна, только по отношению к выбранным точкам, лежащим в данной окрестности. Причем эти точки не должны лежать на поверхности соприкасающегося параболоида, который восстанавливает форму поверхности в данной точке. Таким образом, оценка вероятности воспроизведения формы поверхности в локальной окрестности точки соприкосновения носит относительный характер, т. е. зависит от выбора точек, определяющих поверхность, относительно которой эта оценка и производится.

Первая и вторая квадратичные формы поверхности определяют ее с точностью до движения и зеркального отражения. Необходимым и достаточным условием аналитического задания поверхности, таким образом, является система уравнений, состоящая из шести уравнений. Три уравнения относятся к первой квадратичной форме и три ко второй. Система уравнений имеет шесть неизвестных – коэффициенты квадратичных форм поверхности. Для

того чтобы составить искомую систему уравнений, следует знать координаты четырех точек. Одну из точек можно выбрать в качестве начала локальной пространственной системы координат.

Пусть поверхность, относительно которой в локальной окрестности данной точки определяется искомая вероятность, заданная четырьмя точками. Одна из этих точек – точка-вершина соприкасающегося параболоида, который воспроизводит данную поверхность в локальной окрестности, т. е. данная точка. По координатам этих четырех точек можно определить главные кривизны поверхности, которую они определяют в данной точке. По этим главным кривизнам можно рассчитать существенную компоненту тензора Римана-Кристоффеля поверхности.

Соприкасающийся параболоид в данной точке строится с определенной степенью точности. Зная существенную компоненту тензора Римана-Кристоффеля этого параболоида можно определить вероятность того, что данный параболоид в окрестности заданной точки, воспроизводит поверхность микрорельефа, относительно поверхности, которая определяется четырьмя заданными точками.

Условная вероятность восстановления формы поверхности микрорельефа равна отношению существенных компонент тензоров Римана-Кристоффеля соприкасающегося параболоида и поверхности, относительно которой эта вероятность определяется.

$p = \frac{R_{1221}}{R_{1221}^*}$ , где  $R_{1221}$  – существенная компонента тензора Римана-Кристоффеля соприкасающегося параболоида,  $R_{1221}^*$  – существенная компонента тензора Римана-Кристоффеля поверхности, относительно которой вероятность определяется.  $R_{1221}^* > R_{1221}$ .

## **2 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УСЛОВНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОРЕЛЬЕФА В ЛОКАЛЬНОЙ ОКРЕСТНОСТИ ДАННОЙ ТОЧКИ**

Координаты точек, задающих поверхность, относительно которой определяется искомая вероятность:  $x_{ij}$ , где  $i = \overline{1,3}, j = \overline{1,4}, x_{1j} = x_j, x_{2j} = y_j, x_{3j} = z_j$ .

$x_{i1}$  - вершина соприкасающегося параболоида (точка в которой восстанавливается поверхность микрорельефа).

Если  $x_{i1} = 0, i = \overline{1,3}$ , то система уравнений для определения коэффициентов первой и второй квадратичных форм поверхности, относительно которой рассчитывается вероятность:

$$\begin{cases} 2x_{3j} = b_{11}x_{1j}^2 + b_{12}x_{1j}x_{2j} + b_{22}x_{2j}^2 \\ s_j = a_{11}x_{1j}^2 + a_{12}x_{2j}^2 + a_{22}x_{3j}^2 \end{cases} \quad (1)$$

где  $j = \overline{2,4}, s_j$  – длины дуг, лежащих на поверхности соприкасающегося параболоида между точками  $(x_{11}, x_{21}, x_{31})$  и  $(x_{12}, x_{22}, x_{32}), (x_{11}, x_{21}, x_{31})$  и  $(x_{13}, x_{23}, x_{33}), (x_{11}, x_{21}, x_{31})$  и  $(x_{14}, x_{24}, x_{34}), a_{11}, a_{12}, a_{22}, b_{11}, b_{12}, b_{22}$  – координаты первой и второй квадратичных форм. Для расчета относительной вероятности и достаточно ограничиться первыми тремя уравнениями системы (1). По известным коэффициентам  $b_{11}, b_{12}, b_{22}$  записываем уравнение соприкасающегося параболоида в системе координат хуz.

$$2z = b_{11}x^2 + b_{12}xy + b_{22}y^2. \quad (2)$$

Применив преобразование:

$$x = X \cos \alpha - Y \sin \alpha$$

$$y = X \sin \alpha - Y \cos \alpha$$

$$z = Z.$$

Перейдем от системы координат хуz к системе координат XYZ, в которой уравнение (2) примет вид:

$$2z = s_1 X^2 + s_2 Y^2.$$

где  $s_1$  и  $s_2$  – корни характеристического уравнения.

$$s^2 - (b_{11} + b_{22})s + (b_{11}b_{22} - b_{12}^2 / 4) = 0.$$

Угол поворота  $\alpha$  системы координат XYZ относительно системы координат хуз вокруг общего начала координат определяется, как

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{2(s_1 - b_{11})}{b_{12}} = \operatorname{arctg} \frac{b_{12}}{2(s_1 - b_{22})}$$

или

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{2(s_2 - b_{11})}{b_{12}} = \operatorname{arctg} \frac{b_{12}}{2(s_2 - b_{22})}.$$

Отсюда имеем:

$$K_1 = s_1, K_2 = s_2.$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – главные кривизны соприкасающегося параболоида относительно поверхности.

Тогда:

$$R_{1221}^* = K_1 K_2 = s_1 s_2,$$

учитывая, что  $R_{1221} = k_1 k_2$ , где  $k_1$  и  $k_2$  – главные кривизны соприкасающегося параболоида, который является элементом модульной геометрической модели поверхности микрорельефа.

Искомая вероятность:

$$p = \frac{k_1 k_2}{s_1 s_2}.$$

Условие выбора точек поверхности, относительно которой рассчитывается искомая вероятность.

Точки  $x_{ij}$  выбираются таким образом, чтобы выполнялось условие  $k_1 k_2 < s_1 s_2$ , т. е. аппликаты точек соприкасающегося параболоида-элемента модульной геометрической модели, должны быть больше по величине, чем аппликаты точек соприкасающегося параболоида поверхности, относительно которой определяется искомая вероятность.

Пусть модульная геометрическая модель поверхности микрорельефа состоит из  $N$ -соприкасающихся параболоидов. Вероятность восстановления формы поверхности микрорельефа в локальной окрестности точки соприкосновения  $p_\gamma$ , где  $\gamma = \overline{1, N}$ , тогда вероятность восстановления формы поверхности микрорельефа в границах модульной геометрической модели  $p = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_N$ , т. к. каждый из соприкасающихся параболоидов восстанавливает форму поверхности независимо от другого. Дело в том, что в общем случае шаг разбиения по осям  $x$  и  $y$  может быть переменным. Здесь имеется ввиду глобальная система пространственных координат, в которой заданы профили микрорельефа, необходимые для структурирования модульной геометрической модели.

### **3 ВЕРОЯТНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ**

Процесс формирования микрорельефа поверхности детали в случае плоского шлифования можно считать Марковским [1,3,4,5]. Действительно, закон распределения кривизны микрорельефа, в смысле Римана-Кристоффеля, в «будущий момент времени»  $t_k$  зависит только от значения кривизны этого процесса в «настоящий момент времени»  $t_{k-1}$  и совершенно не зависит от того, как изменялась кривизна процесса «в прошлом».  $k = \overline{1, \xi}$  – индекс, характеризующий выбранные моменты времени.

Плотность вероятности кривизны Марковского случайного процесса  $R_{1221}(t)$  любого порядка может быть выражена через условные двумерные плотности вероятности [6] типа  $f(R_{1221,k} | R_{1221,k-1})$ , где  $R_{1221,k}$  и  $R_{1221,k-1}$  – тензор кривизны микрорельефа в моменты времени  $t_k$  и  $t_{k-1}$  – соответственно и плотность вероятности  $f(R_{1221,1})$  кривизны в первый момент времени.

Однако и условные двумерные законы распределения и одномерный закон распределения однозначно выражаются через двумерные законы распределения.

Следовательно, все законы распределения Марковского случайного процесса формирования микрорельефа в случае плоского шлифования однозначно могут быть

выражены через двумерные законы распределения, т. е. двумерный закон распределения  $f(R_{1221,t}; R_{1221,i})$ , заданный для любых значений моментов времени  $t$  и  $i$ , который является полной характеристикой процесса.

Определим уравнение, которое будет являться моделью процесса формирования микрорельефа поверхности обрабатываемой детали в случае плоского шлифования.

Пусть в этом уравнении роль случайной функции играет существенная компонента тензора кривизны  $R_{1221}(x, y, z, t)$ , зависящая от точки с координатами  $x, y, z$ , где эта кривизна определяется и от момента времени  $t$ , в который производятся измерения, позволяющие эту кривизну вычислить.

В процессе обработки поверхности детали координаты  $x$  и  $y$  точек, в которых определяется кривизна – не изменяются. Координата  $z$  для этих точек будет изменяться. Учитывая то, что в процессе шлифования точка, в которой вычисляется кривизна с заданными координатами  $x$  и  $y$  – существует и является единственной для данного момента времени, не смотря на изменение координаты  $z$ , полагаем: тензорное поле микрорельефа  $R_{1221}(x, y, z, t)$  зависит только от времени и координаты  $z$ , т. е.  $R_{1221} = R_{1221}(z, t) = R(z, t)$ .

Результат формирования микрорельефа для локальной области в точке с заданными координатами  $x$  и  $y$  в течение определенного промежутка времени  $\Delta t$  практически ничем не будет отличаться от результата формирования микрорельефа в данный момент времени  $t$  в различных точках обрабатываемой поверхности. Причина этого в том, что в формировании микро геометрии поверхности в первом и втором случаях принимают участие одни и те же абразивные зерна, заделанные в связке круга.

Исходя из этого, можно положить выполнение условия:

$$\frac{\partial^2 R(z, t)}{\partial t \partial z} = \frac{\partial^2 R(z, t)}{\partial z \partial t}, \quad (3)$$

которое является условием того, что функция  $R(z, t)$  является полным дифференциалом:

$$dR(z, t) = \frac{\partial R(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial R(z, t)}{\partial t} dt.$$

При этом считаем, что функция  $R(z, t)$  задана в односвязной области.

В рамках модульной геометрической модели микрорельефа, локальная окрестность данной точки поверхности задается частью соприкасающегося параболоида в системе координат XYZ, начало которой находится в его вершине:

$$Z = \frac{1}{2}(k_1 X^2 + k_2 Y^2),$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – главные кривизны, причем  $k_1 = k_1(t), k_2 = k_2(t)$  – функции от времени.

Разложим функции  $k_1$  и  $k_2$  в ряд Тейлора, ограничиваясь первым по порядку производной членом разложения:

$$k_1(t) \cong k_1(t_0) + \left. \frac{\partial k_1(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} (t - t_0),$$

$$k_2(t) \cong k_2(t_0) + \left. \frac{\partial k_2(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} (t - t_0),$$

где  $k_1(t_0)$  и  $k_2(t_0)$  – главные кривизны в момент времени  $t_0$ .

Тензор Римана – Кристоффеля:

$$R(t) \cong k_1(t) k_2(t) = k_1(t_0) k_2(t_0) + \left( k_1(t_0) + \left. \frac{\partial k_2(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} + k_2(t_0) + \left. \frac{\partial k_1(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} \right) (t - t_0), \quad (4)$$

Определим первую производную по времени от этого выражения:

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = k_1(t_0) \left. \frac{\partial k_2(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} + k_2(t_0) \left. \frac{\partial k_1(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0}.$$

Обозначение  $R(t)$  означает, что тензор Римана – Кристоффеля зависит только от времени, т. е. формирование микрорельефа рассматривается в точке с заданными координатами  $x$  и  $y$ . Под изменением координаты  $z$  будем иметь в виду не изменение  $z$  в точке с заданными координатами  $x$  и  $y$ , этим изменением мы пренебрегаем, а изменение  $z$  при переходе от точки к точке. Иными словами, изменение координаты  $z$  связано с изменением координат  $x$  и  $y$ , а не с зависимостью  $z$  от времени  $t$  в данной точке.

Ограничиваясь в (4) первым членом, получим:

$$\frac{\partial R(z,t)}{\partial t} \cong -AR(z,t),$$

где  $A$  – коэффициент.

В соответствии с замечанием, сделанным в связи с обоснованием соотношения (3) можно положить:

$$\frac{\partial R(z,t)}{\partial z} \cong \frac{\partial R(z,t)}{\partial t},$$

$dz=dt$ .

В данной точке с течением времени микрорельеф формируется абразивными зернами, совершающими механическое движение по гармоническому закону относительно этой точки, если пренебречь скоростью продольной подачи шлифовального круга по сравнению с окружной скоростью зерна, заделанного в связке на поверхности инструмента. Таким образом, можно положить, что изменение со временем тензора Римана – Кристоффеля будет происходить по закону:

$$\frac{\partial R(z,t)}{\partial t} \cong F(t),$$

Из выражения для полного дифференциала функции  $R(z, t)$  получим:

$$\frac{dR(t)}{dt} + AR(t) = F(t). \tag{5}$$

Уравнение (5) имеет вид уравнения Фоккера – Планка [5], описывающее систему броуновских частиц на кинетическом уровне.  $F(t)$  - случайный процесс, обладающий свойством «белого шума», для которого в диапазоне частот, существенном для рассматриваемой динамической системы, можно считать, что спектральная плотность есть величина постоянная:

$S(w)=C$ , где  $w$  – частота.

Корреляционная функция для «белого шума»:

$K(\tau) = 2\pi c \delta(\tau)$ , где  $\tau = t_2 - t_1$ ,  $t_1, t_2$  - моменты времени.  $\delta(\tau)$  - дельта – функция.

(Будем считать  $F(t) = 0$ ).

Процесс формирования микрорельефа поверхности детали шлифованием, для площадки, когда продольной подачей круга можно пренебречь по сравнению с его вращательным движением вокруг оси, описывается уравнением, которое является моделью для многих физических процессов – типа броуновского движения.

Из теории Марковских процессов известно, что стационарное решение второго уравнения Колмогорова для данного случайного процесса т.е. для процесса, определяемого уравнением (5) имеет вид:

$$f(R(t + \tau)) = \frac{B}{2\pi c} e^{-\frac{AR^2(t+\tau)}{2\pi c}}, \text{ где } f(R(t + \tau)) = f(t, R(t); \tau, R(t + \tau)),$$

т. е.  $f(R(t + \tau))$  - условная плотность вероятности тензора Римана – Кристоффеля в момент времени  $t + \tau$  подчиняется нормальному закону распределения с дисперсией

$$\sigma^2 = \frac{\pi c}{A}.$$

Записав плотность нормального закона в обычной форме:

$$f(R(t + \tau)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{R^2(t+\tau)}{2\sigma^2}},$$

определим постоянную В:

$$B = \sqrt{2AC}.$$

Определим постоянную С. Исходя из электродинамической аналогии коэффициенты  $S_l(w_l)$ , где  $l = \overline{1, N}$ , пропорциональны энергии, приходящейся в среднем на гармоническое колебание частоты  $w_l$ , т. к. энергия электрического тока пропорциональна квадрату амплитуды соответствующей гармонии. Совокупность  $S_l(w_l)$  – энергетический спектр процесса. В указанном выше смысле спектральная плотность  $S(w)$  – плотность энергии на единицу частоты.

Спектральное разложение стационарной случайной функции  $F(t)$  имеет вид:

$$F(t) = \sum_{l=1}^{l=N} \Delta R_l \cdot \cos w_l t = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{l=N} \Delta R_l \cdot (e^{iw_l t} + e^{-iw_l t}) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{l=-N \\ l \neq 0}}^{l=N} \Delta R_l e^{iw_l t} = \frac{\overline{\Delta R}}{2} \sum_{\substack{l=-N \\ l \neq 0}}^{l=N} e^{iw_l t}, \quad (6)$$

где  $\Delta R_l$  - изменение тензора Римана – Кристоффеля, полученное в локальной области данной точки, в результате съема припуска  $l$  – ым зерном. Рассматриваются зерна, расположенные на поверхности шлифовального круга, снимающие припуск именно с локальной области данной точки. Число этих зерен равно N.  $\overline{\Delta R}$  - среднее значение  $\Delta R_l \cdot \Delta R_l = \Delta R_{-l}$ .

Определяя корреляционную функцию  $F(t)$  по общим правилам, получим:

$$K(\tau) = \frac{\overline{\Delta R}^2}{4} \sum_{\substack{l=-N \\ l \neq 0}}^{l=N} e^{iw_l \tau} = 2\pi \cdot \frac{\overline{\Delta R}^2}{4} \cdot \delta(\tau). \quad (7)$$

откуда  $S(w) = \overline{\Delta R}^2 / 4$ .

При выводе соотношения (7), учитывалось то, что из (6) следует  $\overline{F(t)} = 0$ .

Вероятность формирования микрорельефа определяется, как произведение вероятностей формирования локальных участков в данных точках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аврутин, Ю. Д. Описание рельефа рабочей поверхности шлифовального круга и анализ процесса формирования шлифовальной поверхности. В кн.: Труды ВНИИАШ, № 14, Л., 1973, с. 27—39.
2. Белкин, Е. А. Модульно-геометрический метод математического моделирования поверхности с числовыми отметками // Известия ТулГУ. Серия. Технологическая системотехника. Вып.4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С.68-72.
3. Зубарев, Ю. М. Комплексная математическая модель процесса плоского шлифования // Академический вестник. Вып.1.-СПб.: Изд. СПб. Института машиностроения, 1998. С.22-37.
4. Попов С. А., Соколова Л. С. Статистические характеристики геометрии режущей поверхности абразивных инструментов. В кн.: Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки». Л., СЗПИ, 1974, с. 91—97.
5. Пугачев В. С., Сеницын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. М.: Наука, 1985. 560 с.
6. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. Изд. 2-е, М., «Наука», 1968, 463 с.

### Белкин Евгений Александрович

Кандидат технических наук, зав. лабораторией физики Орловского института усовершенствования учителей.

Ул. Герцена, 19. м.т.

моб./тел: 89208086508,

e-mail: molniya166@yandex.ru

И.М. ВИНОКУРОВА, В.П. СМОЛЕНЦЕВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

*В материалах статьи приводятся данные по определению особенностей влияния кинетических параметров на формообразование при электрохимической обработке металлов. Определены основные параметры, оказывающие влияние на процесс теплообмена, позволяющие моделировать массоперенос в турбулентных потоках с учетом импульсного электролиза.*

*In the article the data are presented defining the peculiarities of the of kinetic parameters influence on the metals forming during the electrochemical processing. The key parameters influencing heat mass process transfer are determined, allowing to model massconepенос in turbulent streams in view of pulse electro lease.*

Теория массопереноса в химических системах является одним из важнейших разделов кинетики электродных процессов изучающих гидродинамику в межэлектродном зазоре. При постоянно токовых режимах обработки переход от ламинарного течения к турбулентному, зависит от скорости протока электролита и наличия центров зарождения вихревых потоков электролита в канале обработки. Число таких центров является случайной величиной и поэтому массоперенос при этих условиях не может быть оптимальным.

Одной из существенных особенностей турбулентного массопереноса является диффузионный слой, возникающий вблизи поверхности электрода в условиях электрохимической реакции, который располагается глубоко внутри вязкого подслоя. Другой особенностью таких систем является наличие двойного электрического слоя на границе электрод-раствор, где конечная скорость электрохимических процессов оказывает заметное влияние на характеристики турбулентного массопереноса свойственного при импульсных режимах. В движущейся жидкой среде возникают внутренние силы механической природы, учитывающие давление и вязкое трение. Возьмем небольшую площадку поверхности  $d\mathbf{S}$  в потоке и разложим силы слоев жидкости на составляющие, направленные по касательной и по нормали к  $d\mathbf{S}$  рис. 1 [1]. Нормальную составляющую силы не зависящую от ориентации площадки примем за давление  $P$ . Касательная составляющая силы, зависит от ориентации площадки и обозначается тензором касательных напряжений, имеющим девять компонент.

Исходя из закона сохранения массы и второго закона Ньютона, динамику капельных жидкостей, описываем уравнениями неразрывности и Навье - Стокса. При условии, что мы пренебрегаем сжимаемостью среды уравнение неразрывности примет следующий вид [1]

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = - \left( \frac{1}{\rho} \right) \nabla p + \gamma \nabla^2 \vec{v}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$\gamma = \frac{\mu}{\rho}$  - кинематическая вязкость;

$t$  - время;  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$  - вектор плотности потока массы;

$c$  - концентрация диффундирующего вещества, которое будем считать пассивной примесью.

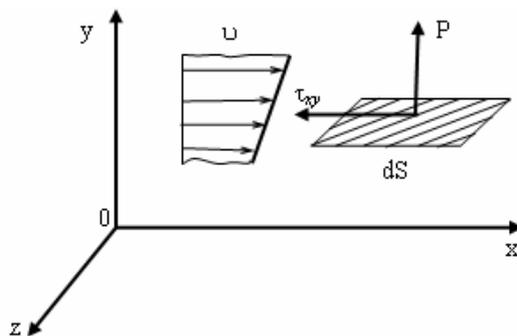


Рисунок 1 – Внутренние силы, возникающие в движущейся жидкой среде сжимаемостью среды получаем уравнение.

Граничным условием для вязкой жидкости является равенство скорости нулю на твердой границе потока  $A$

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = 0 \quad (\vec{r} \in A), \quad (3)$$

где  $\vec{r} = (x, y, z)$  - радиус-вектор и декартовы координаты точки в пространстве.

Уравнение неразрывности (1) и условие прилипания (3) позволяют вблизи твердой границы потока определить функциональную зависимость компонента вектора скорости от расстояния до поверхности  $y$  рис. 2 [1].

При малых значениях  $y$  скорость жидкости можно представить в виде ряда Тейлора

$$\vec{v} = \vec{v}|_{y=0} + \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial y}\right)\Big|_{y=0} y + 0,5 \left(\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial y^2}\right)\Big|_{y=0} y^2 + \dots \quad (4)$$

Уравнение Навье-Стокса для нормальной компоненты скорости  $v_x$  имеет вид

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right). \quad (5)$$

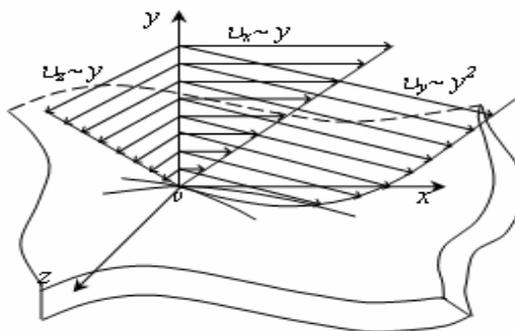


Рисунок 2 – Функциональная зависимость компонент вектора скорости от расстояния до поверхности вблизи твердой границы потока [5]

При малых значениях  $y$  функциональная зависимость компонент вектора скорости от расстояния до поверхности будет

$$v_x = \left(\frac{\tau_x}{\mu}\right)y; \quad v_z = \left(\frac{\tau_z}{\mu}\right)y; \quad v_y = \left(\frac{y^2}{2\mu}\right)\nabla_y p, \quad (6)$$

где  $\nabla_y p = \frac{\partial p(0)}{\partial y}$  - нормальный градиент давления на границе потока.

Значения (6) получены для мгновенных значений компонента вектора скорости. В турбулентных потоках скорость и давление в большей части представляется как сумма осредненных (по времени или статическому ансамблю) и пульсационных величин [2-5]

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{v}'; \quad p = \bar{p} + p'; \quad \vec{u} = \langle \vec{v} \rangle, \quad (7)$$

где  $u$  - средняя скорость движения флуктуаций (здесь и далее статическое осреднение обозначается чертой над величиной или угловыми скобками  $\langle \rangle$ , пульсационные величины обозначаются штрихами).

В силу линейных свойств операции статистического осреднения [2] формулы (5) справедливы как для пульсационных, так и для осредненных компонентов скорости, т. е.

$$u_x = \left( \frac{\bar{\tau}_x}{\mu} \right) y; \quad u_z = \left( \frac{\bar{\tau}_z}{\mu} \right) y; \quad u_y = \left( \frac{y^2}{2\mu} \right) \nabla_y p,$$

$$v'_x = \left( \frac{\tau'_x}{\mu} \right) y; \quad v'_z = \left( \frac{\tau'_z}{\mu} \right) y; \quad v'_y = \left( \frac{y^2}{2\mu} \right) \nabla_y p', \quad (8)$$

Таким образом, величина нормальной компоненты средней скорости определяется изменением среднего значения напряжения вязкого трения  $\bar{\tau}$  вдоль направления потока. Результаты таких исследований показывают, что чем выше степень турбулентности потока, тем больше коэффициент использования объема электролита находящегося в пространстве межэлектродного зазора. Отсюда следует, что для повышения эффективности процесса электрохимической обработки металлов необходимо использовать такие режимы проточного электролита, при которых течение рабочей среды переходит в турбулентный режим.

Экспериментальными исследованиями ЭХРО титана и его сплавов [1, 3] нами было определено, что локальные температуры на отдельных участках электродов сильно различаются своей величиной вследствие дифференцированного токораспределения и наличия других факторов, оказывающих вполне определенное влияние на процессы теплопереноса. Поэтому аналитическое решение задачи мы относили к определению температуры в неограниченном теле трёхмерного пространства для систем электрод-электролит рис.3 [4].

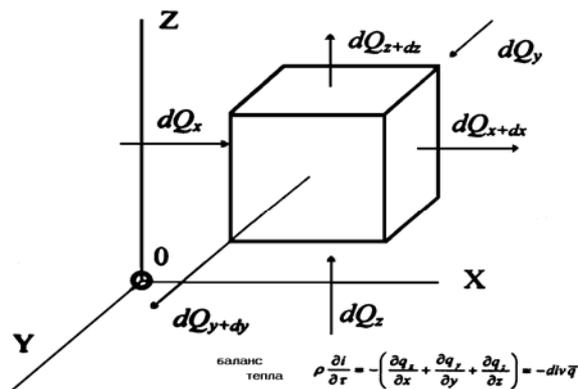


Рисунок 3 – Схематическое изображение процесса теплопереноса для элементарного объема электролита

Локализация тепловой энергии на поверхности электрода (в двойном электрическом слое) одновременно вызывает изменение его температуры, а часть энергии теплового импульса распространяется в глубину электролита, создавая таким образом “тепловой барьер”, затрудняющий транспортировку разряжающихся ионов к поверхности электрода.

При действии серии импульсов, должно наблюдаться расширение зоны теплового фронта в глубину электролита, а также увеличение амплитуды теплового импульса.

В нашем случае  $T(x, \tau) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \pm \infty$ . Тепловой баланс (процесс) в таком неограниченном теле состоит из выравнивания температуры, которое возможно в некоторый период времени, принимаемый нами за начальную точку отсчёта. Это возникновение неравномерного распределения температуры возможно в результате кратковременного действия некоторого источника тепла (мгновенного источника тепла, мощность которого пропорциональна  $f(\xi)$ ).

При получении импульсного уравнения теплопроводности предполагается, что стенка (электрод) имеет температуру, равную 0. В начальный момент времени тепловой импульс может изменяться за счёт любого из возможных тепловых эффектов, определяемых химическими и электрическими реакциями.

Момент воздействия импульса принимается за нуль отсчёта. По мнению авторов [4], с математической точки зрения задача поставлена правильно, с физической точки зрения - нет. Трудно представить, что все точки бесконечной поверхности воспримут заданное количество тепла, которое является произвольно большим ( $Q$  задаётся на единицу поверхности), по двум причинам: во-первых, из-за трудности осуществления эксперимента, во-вторых, из-за трудности воспроизведения какого-либо действия в плоскости, не имеющей толщины.

По-нашему мнению, экспериментальные затруднения могут быть преодолены с помощью электрохимических систем. В частности, процесс анодной обработки титановых сплавов в импульсных режимах электролиза может служить достаточно хорошим аналогом физической модели. В данном случае, тепловые процессы локализованы в основном в двойном электрическом слое ( $\delta = 1-3$  молекулярных слоя), токораспределение в режимах импульсного тока с большим значением скважности импульсов можно считать равномерным. Основная трудность состоит в измерении количества тепловой энергии в таком малом по толщине слое, но и они могут быть преодолены с помощью достаточно простых аналитических выкладок.

Общее уравнение теплопроводности при воздействии теплового импульса прямоугольной формы имеет вид

$$d\theta = \mathfrak{Z} \cdot P \cdot du \cdot dl, \quad (9)$$

где  $\mathfrak{Z}$  - импульсный коэффициент;  $P$  - выделяемая мощность;  $du$  - интервал времени;  $dl$  - длина излучателя.

Величина  $P \cdot dl$  является постоянной, поскольку нагрев происходит от источника постоянной мощности  $P_0$  в одном и том же элементе  $dl$ .

При  $t < u_2$  наблюдаемые эффекты обусловлены высвобождением энергии в моменты  $u_1 \leq t$  для  $t \leq u_2$

$$\theta = P_0 \cdot dl \int_{U_1}^t \mathfrak{Z} du, \quad (10)$$

для  $t > u_2$

$$\theta = P_0 \cdot dl \int_{U_1}^{U_2} \mathfrak{Z} du. \quad (11)$$

В условиях непрерывного электролиза от  $u_1$  до бесконечности всегда  $t < u_2$  и нужно использовать формулу (10).

Наоборот, в случае прекращения непрерывного нагрева, начиная с  $u_2$ , имеем для  $t \leq u_2$

$$\theta = P_0 \cdot dl \int_{-\infty}^t \mathfrak{Z} du, \quad (12)$$

для  $t > u_2$

$$\theta = P_0 \cdot dl \int_{-\infty}^u \mathfrak{Z} du. \quad (13)$$

Уравнение прямоугольного импульса (11) можно рассматривать как сумму двух уравнений: уравнение непрерывного нагрева начинается с  $u_1$  при мощности источника  $P_0$  и уравнение непрерывного охлаждения, начиная с  $u_2$ , при мощности источника  $P_0$ .

Действительно при  $t \leq u_2$

$$\theta = P_o \cdot dl \int_{u_1}^{u_2} \mathfrak{Z} du - 0 \quad (14)$$

и при  $t \geq u_2$

$$\theta = P_o \cdot dl \int_{u_1}^t \mathfrak{Z} du - P_o \cdot dl \int_{u_2}^t \mathfrak{Z} du = P_o \cdot dl \int_{u_1}^{u_2} \mathfrak{Z} dl, \quad (15)$$

т. е. эти два уравнения, безусловно, такие же, как и уравнения (10) и (11).

Таким образом, начиная с  $u_2$ , чтобы выполнить условие (15), нужно прекратить нагрев, и с того момента начать охлаждение. Этим и объясняется изменение температуры тела в результате действия прямоугольного импульса во времени.

По аналогии, с электрическим импульсом П – типа - это явление тождественно нарастанию потенциала во времени при действии серии импульсов. Как и для теплового импульса, для электрического аналога кривую охлаждения можно заменить потенциалом противоположного знака.

Для прямоугольного импульса в пространстве тепловая мощность  $P_o$  постоянна, но она выделяется в интервале от  $l_1$  до  $l_2$  в течение очень короткого периода времени.

Отсюда следует, что каким бы не было значение  $t$ :

$$\theta = P_o \cdot du \int_{l_1}^{l_2} \mathfrak{Z} dl . \quad (16)$$

Таким образом, оптимизация параметров в отличие от классической кинетики осуществляется на уровне размеров элементарных участков, ограниченных пределами в десятки мкм.

В этом случае механизм массопереноса играет решающую роль и поэтому к его изучению проявляется особый интерес. Описание этих процессов часто носит вероятностный характер, и граница их находится между законами классической и квантово-механической теорий поведения частиц.

Выбор главного критерия при анодной обработке металлов определяется самой электрохимической технологией.

Серия коротких импульсов (с малым значением  $J_m$ ) маркирует на поверхности зоны травления (сканирующие импульсы). Вслед за первой серией логическая интегральная схема формирует серию импульсов ( $J_m$  которые в 2÷3 раза выше). С помощью этой серии осуществляется расширение каналов (формирующие импульсы). Число таких последовательно следующих серий определяется исходя из поставленной задачи для формирования профиля канала рис. 4 [1].

В этом случае задача оптимизации процесса становится реально решаемой и локальные изменения температур, концентраций, токов отдельных участков электрода становится менее заметными. Скорости перемещения ионов-окислителей и продуктов реакции возрастают, что способствует улучшению условий тепломассопереноса в зоне электрохимической реакции.

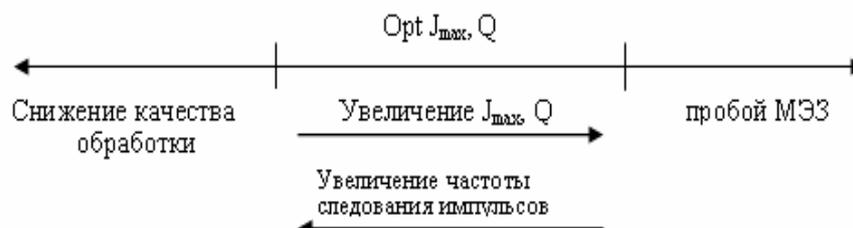


Рисунок 4 – Область возможных оптимальных значений  $J_{max}$

При определении параметров импульсного тока (частоты следования, их длительности и скважности) нижний предел частоты следования определяется из условий

обеспечения стабильного состояния системы электрод-электролит, а верхний предел и длительность импульса должны обеспечивать возможность разряда потенциалоопределяющей иона.

При выборе значения скважности импульсов основным условием являлось обеспечение возможности сохранения поверхности электрода в активном состоянии. Для определения экстремальных точек на кривых зависимостей применяется их дифференцирование непосредственно в ходе эксперимента.

Нарастание потенциала электрода во времени и аналогичное увеличение порога теплового барьера при действии серии импульсов в начальный момент компенсируют друг друга. Так как время установления стационарного значения электрического импульса значительно меньше, чем теплового, то с увеличением продолжительности электрохимического процесса влияние эффекта тепловыделения на электроде будет возрастать. Это связано, во-первых, с расширением (углублением) теплового фронта в сторону слоёв электролита с более низкой температурой, во-вторых, с возрастанием градиента температуры в около электродном пространстве. Теплоперенос от электрода в направлении более холодных слоёв обеспечивает более интенсивный отвод продуктов реакции (гидратированных ионов), одновременно затрудняя транспортировку ионов-окислителей к поверхности анода. Тепловой барьер, возникающий вблизи электрода, играет роль дополнительного перенапряжения.

Неполная тепловая и электрическая релаксация системы электрод электролит обуславливает постепенное нарастание температуры и потенциала. Постоянные экспоненты нарастания будут определяться как параметрами импульсного тока ( $J$ ,  $f$ ,  $Q$ ,  $\tau$ ), так и теплофизическими свойствами электролита.

Перспективы более широкого использования импульсных режимов электрохимической обработки металлов по сравнению со стационарными обусловлены целым рядом причин. Импульсная обработка титана и его сплавов позволяет не только интенсифицировать этот процесс, но и существенно повысить чистоту обработки металла.

Увеличение потенциалов пробоя от импульса к импульсу и последующая стабилизация их значений объясняются выравниванием электрических свойств фазового оксида по поверхности, количество мест на анодной поверхности с пониженным значением электрической прочности уменьшается, и затрудняется процесс пробоя. Как было обнаружено, свойства вновь образовавшейся плёнки зависят от длительности катодной предобработки. Если во время паузы поддерживать анодные потенциалы за счёт положительной составляющей тока, то в активных порах могут протекать конкурирующие процессы образования и растворения окислов титана [3].

Модель высокоскоростного растворения титановых сплавов представляется следующим образом:

1) вблизи межфазной границы термодинамически возможно существование промежуточных комплексов с различными степенями окисления входящих в них металлических ионов. По мере увеличения степени окисления ионов, удаляется соответствующая зона от поверхности электрода. Комплексы с низшими степенями окисления адсорбированы на поверхности металла;

2) анионы раствора различного рода в зависимости от природы, располагаются на различном расстоянии от межфазной границы.

Неравномерность съема металла вдоль *МЭЗ* (координата  $x$ ) были рассчитаны с учетом конвективных членов уравнений авторами [5]. Проводя расчеты после выбора оптимальных критериев оптимизации (показателей точности, производительности), можно определить параметры и условия обработки для заданного качества поверхности.

Скорость и глубина процессов анодно-анионной активации и пассивация зависят от следующих параметров импульсного тока:

1. Форма импульса (прямоугольная или пилообразная), определяющая время амплитудного потенциала анодной активации, и время на пассивацию. Процесс пассивации

титана, в зависимости от изменения анодного потенциала, развивается во времени в зависимости от значения прикладываемого анодного потенциала ( $E_a$ ).

2. Амплитуда импульса, определяющая значение прикладываемого анодного потенциала и насколько он будет превышать потенциал образования первых питтингов.

3. Длительность импульса, отвечающая за обширность активации предназначенной для обработки поверхности заготовки в течение одного импульса.

4. Значение  $E_a$  в паузах между импульсами. Необходимо чтобы импульсное напряжение имело постоянную составляющую, которое не позволяло бы пассивировать  $Ti$  во время паузы. Пассивация приводит к дополнительным затратам на повышение прикладываемого потенциала в последующих импульсах, что в свою очередь влияет на производительность и качество обработанной поверхности.

5. Скважность импульсного тока. Необходимо следить за соотношением полноты протекания процесса анодно-анионной активации и пассивации  $Ti$ .

Таким образом, для прохождения электрохимической обработки, необходимо чтобы количество электричества в задаваемом источником питания импульсе существенно превышало величину  $Q$  только на тех участках МЭЗ, где протекает максимальный ток, т. е. там, где МЭЗ минимален. В прилегающих областях даже при протекании тока, превышающего значение плотности анодного тока  $i_a$  перехода от выделения кислорода к активированному растворению, обработка происходить не будет, так как ток здесь меньше и не обеспечивает количества электричества в импульсе, превышающего  $Q$ . Импульсный режим обработки обеспечивает наиболее оптимальные условия осуществления процессов анодной обработки металлов и создает гибкость структур управления параметрами технологического процесса. В работе [6] указывается, что самая максимальная производительность при импульсных режимах для всех исследуемых сплавов при ЭХРО в электролитах обнаружено в электролитах, состав которых позволяет сводить к минимуму процессы газовыделения и наводораживания металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мандрыкина И. М. Исследование взаимосвязи термокинетических и электрохимических параметров при импульсных режимах обработки титановых сплавов // Дис. к. т. н./ВГТУ.-Воронеж, 1998. 208 с.
2. Камья Ф. М. Импульсная теория теплопроводности. М.: Энергия, 1972. 272 с.
3. Шалимов Ю. Н. Оптимизация электрохимического процесса обработки алюминиевой фольги в производстве конденсаторов / Ю. Н. Шалимов, И. М. Мандрыкина, Ю. В. Литвинов Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. 343 с.
4. Графов Б. М., Мартемьянов С. А., Некрасов Л. Н. Турбулентный диффузионный слой в электрохимических системах.- М.: Наука, 1990.-295 с.
5. Саушкин Б. П. Электрохимическая обработка изделий из титановых сплавов / Б. П. Саушкин, Ю. Н. Петров, А. З. Нистрян, А. В. Маслов // Кишинёв. Штиница. 1988. 200 с.
6. Проничев Н. Д., Шманев В. А. Исследование процесса формирования шероховатости поверхности при ЭХО // РЭХО деталей машин. Тула. 1975. С. 188-192.
7. Давыдов А. Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука. 1990. 272 с.

### **Винокурова Ирина Михайловна**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
кандидат технических наук, доцент кафедры “Технология обеспечения гражданской обороны в чрезвычайных ситуациях”

### **Смоленцев Владислав Павлович**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
доктор технических наук, профессор кафедры “Технология машиностроения”

УДК 621.785

В.Н. ХРОМОВ, В.Н. КОРЕНЕВ, В.В. БАРАБАШ

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПОРОШКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ВОДОРОДНО–КИСЛОРОДНЫМ ПЛАМЕНЕМ

*Приведены сравнительные металлографические исследования газопламенных покрытий, полученных при напылении порошковыми материалами водородно-кислородным пламенем, с целью выявления особенностей соединения напыленного металла и основного металла детали, а также для анализа структурных изменений пористости в поверхностном слое детали.*

*Are resulted comparative metallographic researches of the flame coatings received at spraying by powder materials by a hydrogen-oxygen flame, with the purpose of revealing features of connection sprayed metal and the basic metal of a detail, and also for the analysis of structural changes of porosity in a superficial layer of a detail.*

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Успешное решение задач, связанных со снижением металлоемкости конструкции, при одновременном улучшении их технических характеристик ведет к необходимости использования композиционных материалов.

К числу наиболее прогрессивных технологических процессов получения таких материалов относятся методы нанесения защитных и упрочняющих покрытий, особое место среди них занимают процессы газотермического напыления [1].

Применение различных горючих газов для замены ацетилен в процессах газопламенной обработки с каждым годом получает все большее распространение. В качестве заменителей ацетилен широко используются различные горючие газы, в том числе и водород [2].

Поэтому разработка и внедрение технологии газопламенного напыления с использованием водородно-кислородного пламени является актуальной задачей требующей своего решения [3, 4].

Для выявления особенностей соединения напыленного металла и основного металла детали, а также для анализа структурных изменений и распределения температур в поверхностном слое детали были проведены металлографические исследования поверхностного слоя. Металлографическому анализу подвергались обработанные газопламенным напылением порошковых материалов участки.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования покрытия с неоднородной по сечению структурой используют поперечный шлиф, его плоскость перпендикулярна продольной оси. Для изготовления шлифов использовались образцы с нанесенными покрытиями газопламенным напылением с последующим оплавлением с использованием различных горючих газов (по составу). Микрошлифы использовали при анализе структуры напыленного слоя и исследовании пористости покрытия. В качестве образцов использовали образцы из стали 15ХГН2ТА с нанесенными на них покрытиями толщиной 0,6 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Общий вид образцов для исследования покрытий.

Исследуемая поверхность образцов фотографировалась для наглядного изображения с помощью микроскопа «Неофот-21» и вмонтированного фотоаппарата.

Наличие пор и трещин в покрытии определяют при отраженном свете под микроскопом. Для точного подсчета пор и трещин применяют большое увеличение. С поверхностей снимались изображения пористости покрытий, при этом на снимке нумеровалась каждая пора. Среднее число пор ( $N_{\text{ср}}$ ) вычислялось по формуле:

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{общ}}}{S};$$

где  $N_{\text{общ}}$  – общее число пор на контролируемой поверхности;  
 $S$  – площадь контролируемой поверхности,  $\text{см}^2$ .

Эта методика снижает трудоемкость измерения пористости и имеет более высокую точность. Пористость, рассчитанная линейным методом, близка к значению общей пористости, полученной методом гидростатического взвешивания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовленные шлифы подвергались исследованию макро и микроструктуры основных зон. В процессе металлографического анализа проводились визуальный осмотр и фотографирование поверхностей и их отдельных участков. Общий вид напыленной поверхности показан на рисунке 2.

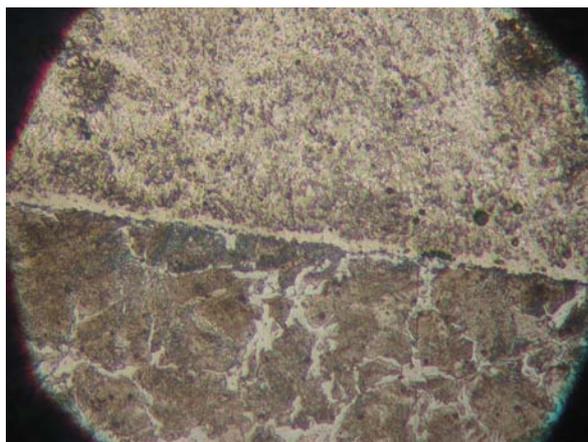


Рисунок 2 – Общий вид поверхности напыленной газопламенным методом порошковых материалов с использованием водородно-кислородного пламени: основа - сталь 15ХГН2ТА, покрытие - порошок ПР-НХ17С4Р4.

При изучении микроструктуры напыленной поверхности, замечено, что напыляемый и основной слой образуют между собой прочное соединение. На микрофотографии видно, что на границе раздела соединение зерен плотное, дефектов не наблюдается. Граница раздела металлов просматривается чётко, что является характерным при соединении металлов с различной структурой и химическим составом.

Изучение поверхностей и их отдельных фрагментов позволяет сделать заключение о хорошей прочности сцепления, как по всему периметру напыляемой зоны, так и его участков. Из рисунков видно, что в светлом слое (зона напыленного порошка) имеются тёмные пятна небольшой величины, разбросанные хаотично. Это пустые пространства, образовавшиеся при испарении газов во время оплавления, шлаковые включения и поры. Структура напыленного и оплавленного металла сложна и представляет собой твёрдый раствор на основе никеля, многокомпонентной эвтектики боридов, карбидов и силицидов. При сплавлении получены мелкокристаллические покрытия - сложный материал, состоящий

из сильно деформированных напыленных частиц, соединённых между собой по контактными поверхностям сварными участками. Сварные участки не заполняют всю площадь контакта (или контактной поверхности) между частицами и поэтому прочность и плотность напыленных покрытий ниже прочности и плотности материала покрытия в контактом состоянии. Прочность самих сварных участков зависит от количества очагов схватывания, образующихся на площади в период удара, деформации и затвердевания частицы и определяется развитием химических элементов материала в контакте.

В покрытии можно выделить структурные элементы, которые отражают процессы его формирования и разделяются границами раздела с определёнными свойствами. Граница раздела между покрытием и основой определяет прочность сцепления между ними. Свойства самого покрытия обуславливаются прочностью сцепления частиц в нем. Граница раздела между слоями (межслойная граница), возникает из-за различной длительности выдержки между нанесением частиц в слое и между слоями. За период выдержки межслойного нанесения, поверхность ранее нанесенного покрытия загрязняется, окисляется и контактные процессы между ней и напыленными частицами затрудняются, что и является причиной возникновения границы. Строение отдельных элементов и всего покрытия в целом хорошо видно на микрошлифе, полученном после газопламенного покрытия.

Металлографический анализ дает представление о механизме образования соединения металлов. Для оценки качества напыленных покрытий проводят их микроструктурные исследования. Оценка качества осуществляется путем сравнения микроструктуры покрытия с эталонной структурой в поперечном сечении. В околошовной зоне образуются локальные участки напыленного слоя, внедрившиеся в виде прожилок в основной металл. В исследованиях Лившица П. С. отмечается, что получению подобной структуры способствует разница в температурах плавления наплавочного и основного металлов. Покрытие из самофлюсующихся сплавов, напыленные газопламенным методом, после напыления имеют пористость, которая доходит до 25%. После проплавления в структуре часть пор исчезает (рис. 3), структура становится плотной и происходит хорошее сплавление с основной. Структура покрытия из напыленного порошка ПР-НХ17СЗР4 после проплавления представляет собой в основном твердый раствор никеля с хромом, в котором образовались сложные эвтектические структуры. Произошло соединение бора и углерода с хромом, что привело к образованию карбидов и боридов хрома. В структуре эти соединения рассеяны в виде кристаллов, что является основной причиной высокой износостойкости такого покрытия. Сплав никеля с хромом придает покрытию стойкость к окислению, изменение химического состава покрытия по высоте влияет на изменение его механических свойств. Повышенная концентрация хрома углерода в верхней части придает ему высокую относительную износостойкость. В нижней зоне, обеднённой легирующими элементами, структурообразование происходит по мартенситной кинетике, что обеспечивает более высокую твердость, но снижает относительную износостойкость на 30-35%.

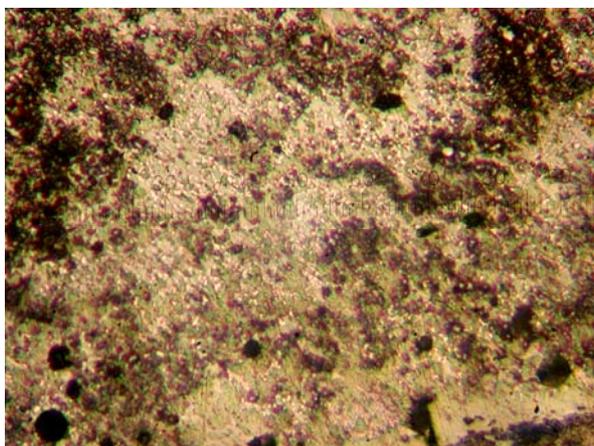
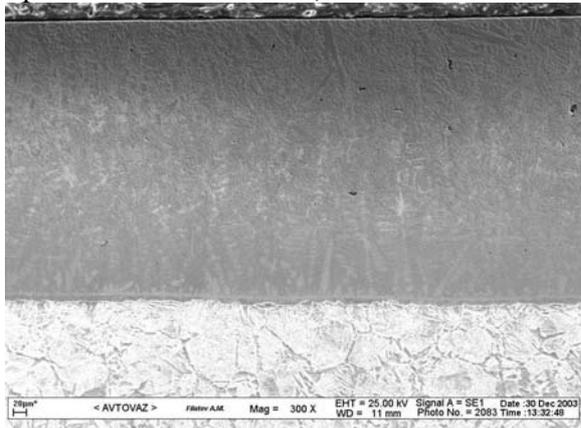


Рисунок 3 – Контроль пористости покрытия

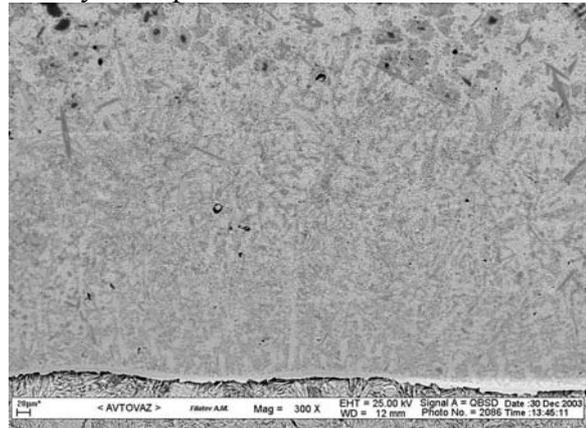
Пористость оплавленного покрытия составляет 1%, что вполне допустимо при эксплуатации детали. При неполном проплавлении покрытия это строение сохраняется. Изменение температуры оплавления заметно отражается на структуре и на свойствах покрытия. Наилучшие свойства обеспечивает однородная по сечению структура с мелкодисперсными выделениями упрочняющей фазы.

Как видно структура покрытий, полученных при различных горючих газах практически одинакова (рис. 4). Отличие в количестве пор в поверхностных слоях.

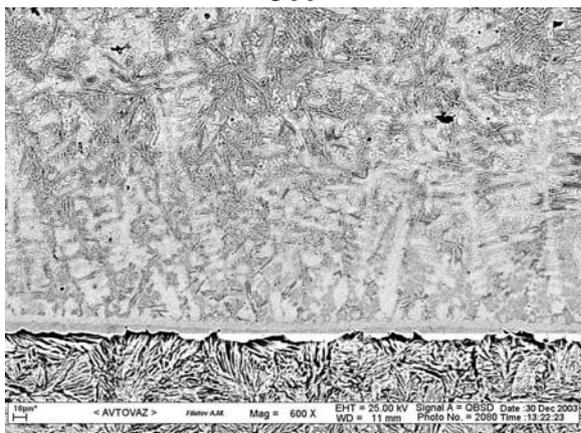
Изменение химического состава покрытия по высоте влияет на твёрдость, поэтому в зоне, обеднённой легирующими элементами, структурообразование произошло по мартенситной кинетике, что обеспечило более высокую твёрдость.



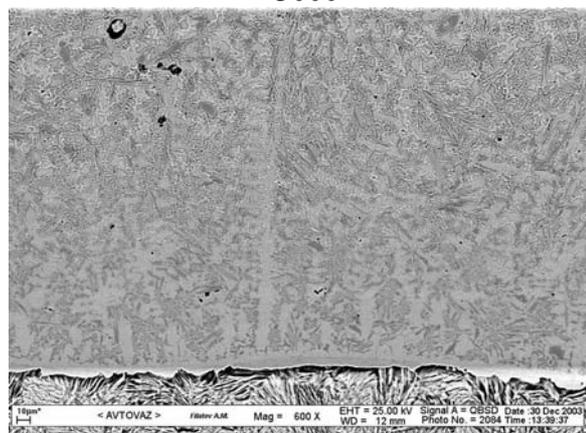
300



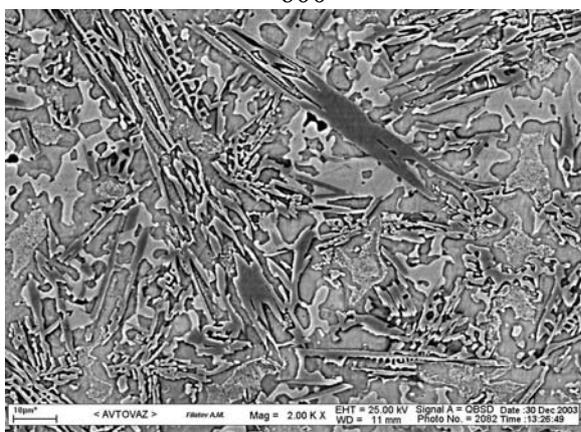
×3000



×600

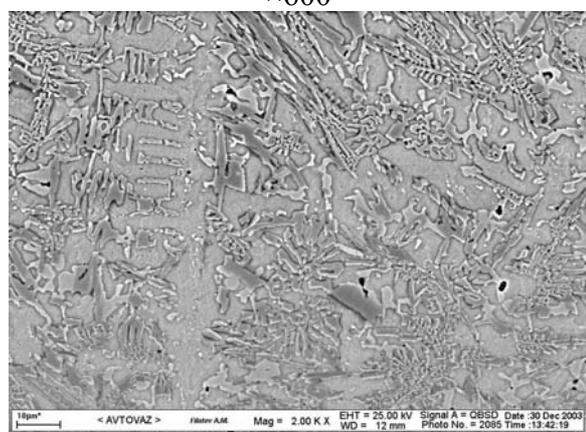


×600



×2000

а)



×2000

б)

Рисунок 4 – Микроструктура поверхности напыленной с использованием пламени различных горючих газов:

а) ацетилено-кислородного пламени, б) водородно-кислородного пламени.

## **ВЫВОДЫ**

1. использование водородно-кислородной смеси с добавкой пропан-бутана для газопламенного напыления дает возможность при напылении получать высококачественный напыленный слой;

2. изучение поверхностей и их отдельных фрагментов позволяет сделать заключение о хорошей прочности сцепления по всей границе раздела покрытия и основы;

3. структура покрытия из напыленного порошка ПР-НХ17СЗР4 после проплавления представляет собой в основном твердый раствор никеля с хромом, в котором образовались сложные эвтектические структуры. Произошло соединение бора и углерода с хромом, что привело к образованию карбидов и боридов хрома. В структуре эти соединения рассеяны в виде кристаллов, что является основной причиной высокой износостойкости такого покрытия. Сплав никеля с хромом придаёт покрытию стойкость к окислению, изменение химического состава покрытия по высоте влияет на изменение его механических свойств;

4. покрытие из самофлюсующихся сплавов, напыленные газопламенным методом, после напыления имеют пористость, которая доходит до 25%. После проплавления в структуре часть пор исчезает, структура становится плотной и происходит хорошее сплавление с основной. Пористость оплавленного покрытия составляет 1%, что вполне допустимо при эксплуатации детали. Структура покрытий, полученных при различных горючих газах практически одинакова. Отличие в количестве пор в поверхностных слоях.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Хромов В. Н., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н. Газотермическое напыление покрытий с использованием водородно-кислородной смеси.//Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции, 28-30 мая 2002г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2002. – 260 с., с.217-220.

2. В. Н. Хромов, М. Г. Дегтярев, А. Л. Семешин, В. В. Барабаш, А. Ю. Родичев, В. Н. Корнев, С. А. Зайцев, Р. Ю. Блишников, С. М. Юрасов, В. В. Гончаренко. Упрочнение и восстановление деталей при производстве и ремонте машин.//Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: Материалы международной научно-технической конференции, М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2003. – 156 с., с.107-115.

3. Хромов В. Н., Мартынов А. Ф., Родичев А. Ю., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н. Анализ износного состояния деталей автомобиля КамАЗ и их восстановление газопламенным напылением.//Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». –2004. - №1-2. – 120 с., с.115-120.

4. Хромов В. Н., А. Л. Семешин, И. И. Величкин, В. В. Анненков, А. Ю. Родичев, В. В. Верцов, В. В. Барабаш, В. Г. Верцов, А. Я. Коровин, Н. Г. Абашев, В. Н. Корнев. Разработка и внедрение технологии восстановления и упрочнения деталей газотермическими покрытиями и упругопластическим деформированием на МП «Орелэлектротранс».//Отчет о НИР. Орел: ОрелГАУ № Г.Р. не имеет, 2001.

### **Хромов Василий Николаевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор  
Тел.: +7(4862)430741  
E-mail: [chrom@orel.ru](mailto:chrom@orel.ru)

### **Корнев Владислав Николаевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.: +7(910)3047479  
E-mail: [korenev-vlad@list.ru](mailto:korenev-vlad@list.ru)

### **Барабаш Виталий Витальевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.: +7(4862)723971  
E-mail: [vbarabash@list.ru](mailto:vbarabash@list.ru)



## **ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ**

УДК 625.08.0014:613.644

В.С. ВАНИН, О.В. ФОМИНОВА, В.А. ДАНИЛОВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПУЩЕНИЯ О ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ КОЛЕСА МАШИНЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МИКРОПРОФИЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ВИБРАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА**

*В данной работе проводится анализ и экспериментальные исследования методов оценки транспортной вибрации, позволяющие выявить характер образования ошибки измерения.*

*In the given job the analysis and experimental researches of methods of an estimation of the transport vibration is carried out, allowing to determine character of formation of a measuring error.*

В данной работе проводится анализ и экспериментальные исследования общепринятого при моделировании допущения о точечном контакте колеса с поверхностью профиля на основе метода /1/, позволяющие выявить характер образования ошибки измерения. Данный метод оценки транспортной вибрации заключается в воспроизведении и регистрации переходной функции (ПФ) – реакции элементов машин на единичное ступенчатое возмущение, и последующем пересчете к нормируемым параметрам вибраций в стандартных или произвольных условиях работы машины. Метод не требует движения исследуемых машин по фактическим дорогам. Трудоемкость испытаний существенно меньше, чем по ГОСТ /2, 3/. Воспроизводимость результатов испытаний машин может быть обеспечена весьма высокой, т.к. все внешние факторы при этих испытаниях хорошо воспроизводятся – влияние человека-оператора полностью исключается путем его замены грузом на сиденье, а воспроизводимость переходных характеристик высока по самой технологии их получения. Метод позволяет вычислять низкочастотные вибрации при предполагаемом проезде машины по любому микропрофилю.

В методах по ГОСТ /2, 3/ допускается оценивать уровни низкочастотных вибраций при проезде мобильной машины по фактическому микропрофилю. Это связано с субъективным выбором зачетного участка дороги. В этих нормативных документах рекомендуется выбирать зачетный участок дороги без заметных выбоин.

Любому измерению присущи ошибки, которые негативно отражаются на объективности оценок исследуемых физических параметров. Различают следующие виды ошибок, характерных для нашего случая: инструментальные, методические, ошибки модели.

Инструментальные ошибки – ошибки электрических приборов, например нелинейность коэффициента усиления измерительного тракта, колебаний токов, напряжений и т.п.

Методические ошибки методов /1,2,3/ связаны со следующими факторами: выбор высоты сбрасывания машины, выбор шага дискретизации и длины реализации свободных затухающих колебаний динамической системы, скорости движения машины, выбор зачетного участка для испытаний и др..

Ошибки модели – ошибки, связанные с представлением реального объекта и реальных связей в виде абстрактных понятий, отражающих главные черты данного объекта, но никогда полностью с ними не совпадающими. При моделировании мобильной машины для методов по ГОСТ /2,3/ сделаны следующие общепринятые в статистической динамике допущения:

- колебательная система мобильной строительной-дорожной машины линейна;
- профиль дороги для правой и левой колеи одинаковый;
- входной сигнал, вызывающий колебания, полностью определяется профилем пути (допущение основано на том, что колеса сохраняют точечный контакт с профилем дороги).

Исследование пределов применимости допущения, точечного контакта колеса машины с поверхностью микропрофиля проводилось на основе предлагаемого метода /1/ при испытаниях на ЦМИС (Центральная машинно-испытательная станция) одноосного прицепа 1-ПТС2 на ленточном стенде. Ленточный стенд предназначен для испытания несущих систем. Установлено, что колеса полуприцепа не полностью копируют профиль стенда. Это связано с геометрическими формами и размерами неровностей стенда.

Исследование величин погрешностей, вносимых в результаты оценки вследствие сглаживания профиля колесом, производилось следующим образом. По методике, изложенной в работе /2/, определялись характеристики микропрофилей ленточного стенда – фактического и сглаженного. Полученные характеристики микропрофилей представлены среднеквадратическими значениями функций высот неровностей фонов в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры микропрофилей стендов (фактического и сглаженного)

Наименование стенда профиля	Среднеквадратические значения высот неровностей микропрофиля, $\sigma$ , см для диапазона частот, Гц			
	0,88 – 1,4	1,4 – 2,8	2,8 – 5,6	5,6 – 11
1. Фактический	1,10	0,80	0,40	0,20
2. Сглаженный	0,96	0,80	0,26	0,07

Преобразование фактического профиля стенда в профиль, в дальнейшем, именуемом как сглаженный профиль, заключалось в следующем. Графическим способом производилась имитация прокатывания колеса по фактическим неровностям стенда. Описываемая колесом траектория, при перекачивании, принималась за преобразованный (сглаженный) микропрофиль стенда, т.е. профиль, для которого во всех его точках обеспечивается контакт колеса с ним.

В соответствии с методом /1/ на основании полученных характеристик профилей стенда (фактического и сглаженного) определены уровни виброускорений на кузове прицепа.

Для контроля выполнялись измерения уровней вибрации при натуральных испытаниях на ленточном стенде. При этом соблюдались идентичные условия испытаний (скорость движения, место крепления акселерометра и др.).

При измерениях низкочастотной вибрации (в диапазоне частот 0,88 – 11,2 Гц) рекомендуется использовать измерительную аппаратуру позволяющую регистрировать процессы ускорений на носитель (осциллограф, магнитограф или самописец) и определять параметры вибраций обработкой записей на ЭЦВМ.

Оценка низкочастотной вибрации предполагает ручную обработку записей произведенных на бумаге осциллографа, заключающаяся в представлении записей непрерывного случайного процесса ускорений в дискретный числовой ряд для последующей обработки на ЭЦВМ по методике изложенной в работе /2/.

Схема измерительного тракта представлена на рис.1.

Первичным устройством, преобразующим неэлектрическую величину в электрический сигнал, является датчик (акселерометр АТ-4), позволяющий регистрировать ускорения от 0 до 50 м/с<sup>2</sup> в частотном диапазоне 0 – 20 Гц с погрешностью 1%, что соответствует реальным ускорениям на рабочем месте оператора машины.

Для усиления сигнала использовался четырехканальный тензометрический усилитель УТ 4-1. Погрешность прибора в диапазоне 0 – 20 Гц составляет 1,5%.

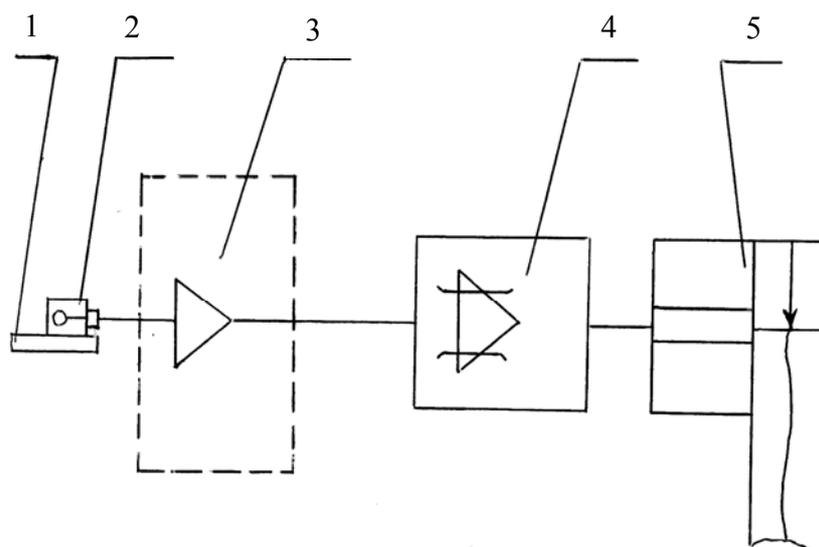


Рисунок 1 – Схема измерительного тракта

1 – место крепления акселерометра; 2 – акселерометр АТ-4; 3 – тензометрический усилитель УТ 4-1; 4 – низкочастотный ограничительный фильтр; 5 – светолучевой осциллограф НО41У 4.2

С целью исключения влияния высокочастотных составляющих процесса при регистрации низкочастотных колебаний и облегчения обработки осциллограмм в измерительном тракте использовался активный ограничительный фильтр с верхней частотой среза 13,5 Гц, нелинейность коэффициента передачи +1%.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовался светолучевой осциллограф НО41У 4.2. Погрешность регистрации силы тока используемого в осциллографе гальванометра +1%.

Питание измерительной аппаратуры в полевых условиях осуществлялось через специальные блоки питания от аккумуляторных батарей, при испытаниях в стационарных условиях – от сети переменного тока.

Результаты испытаний одноосного прицепа 1-ПТС2 представлены в виде графиков рис.2.

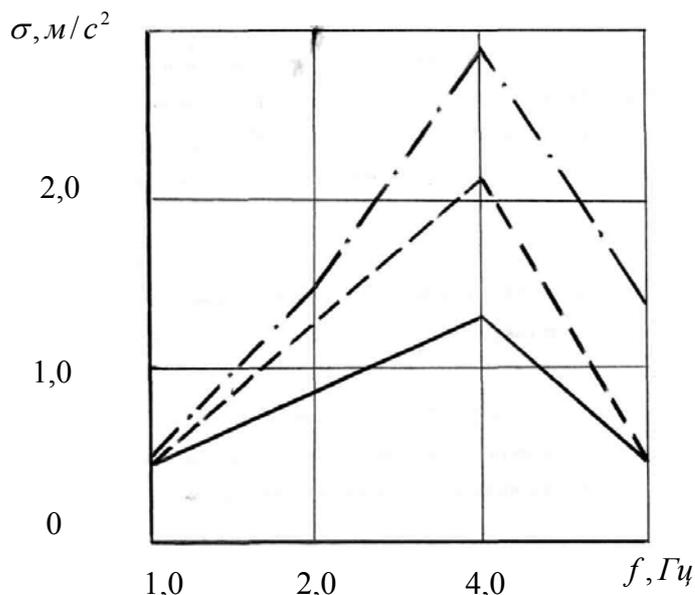


Рисунок 2 – Графики уровней виброускорений на кузове одноосного прицепа 1-ПТС2

— - испытания на ленточном стенде;  
 - - - - - преобразованный профиль;  
 - · - · - · - фактический профиль

Принимая за эталон результаты измерений при испытании на стенде, производилось сравнение результатов оценок предлагаемым методом с использованием в расчетах характеристик фактического и сглаженного профилей стенда с эталонными.

Из анализа графиков следует, что при отсутствии учета сглаживания микропрофиля движителем в результаты оценок параметров вибрации исследуемых машин вносятся погрешности, вызывающие различия оценок до 3-х раз. При преобразовании фактического профиля стенда в профиль, описываемый колесом, в первом приближении (без учета возможного отрыва колеса при наезде на неровность выпуклой формы, деформации шин и др.) наблюдается лучшая сходимость результатов оценок. Различия в этом случае уменьшаются до 1,7 раза.

Результаты исследования показали, что не учет при испытаниях условия сглаживания колесом микропрофиля приводит к ошибкам в оценках уровней низкочастотных вибраций. В данном случае ошибки составили 48%. Поэтому при испытаниях колесных машин по оценке уровней низкочастотных вибраций на рабочих местах операторов необходимо обеспечивать выполнение требования о необходимости копирования колесом поверхности микропрофиля. Выполнение данного условия зависит от фактических соотношений геометрических размеров, форм неровностей искусственных треков, стендов, фактических фонов и размеров колес испытываемой машины, скорости движения, упругости шин и др.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ванин В.С. Экспресс-метод оценки транспортной вибрации. //Строительные и дорожные машины. - 2006. - №10.
2. Межотраслевая методика испытаний тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин по оценке уровня низкочастотной вибрации на рабочем месте механизатора //ГОНТИ НАТИ. – М., 1980. – 27 с.
3. РД 22-32 – 80. Машины строительные и дорожные. Определение эргономических показателей. Введен 01.07.81. – М. 1980. – 93 с.

### **Ванин Владимир Семенович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, декан факультета «Легкая промышленность»  
Тел. (4862) 541685  
E-mail: [mapp@ostu.ru](mailto:mapp@ostu.ru)

### **Фоминова Ольга Владимировна**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, доцент, кафедра «Теоретическая механика»  
Тел. (4862) 419849

### **Данилов Виталий Александрович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Студент факультета «Легкая промышленность»  
Тел. 89192687390  
E-mail: [dan\\_vitalik@rambler.ru](mailto:dan_vitalik@rambler.ru)

УДК 531.43/.46;539.62;621.891;621.004.6;621.89

Е.В. ПАХОЛКИН, Д.А. КУЗЬМИЧЕВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ МАСЕЛ С ПОЗИЦИИ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В ВИДЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

*В работе рассматриваются явления, отвечающие за формирование смазывающих свойств материалов. Целью анализа рассматриваемых процессов является формирование следующей концепции: «состав и функции – показатели качества – диагностические признаки».*

*In work the phenomena which are responsible for formation of greasing properties of materials are considered. The purpose of the analysis of considered processes is formation of the following concept: «structure and functions – quality indicators – diagnostic signs».*

### ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формально к задачам работы относится обобщение сведений о составе моторных масел (ММ), точнее, о разновидностях функциональных присадок к базовой основе, а также о связи состава с эксплуатационными характеристиками масел, в частности, со смазочными свойствами.

Сам по себе подобный материал, очевидно, не представляет какой-либо новизны. Например, описание механизмов действия присадок различного назначения представлено в источниках [1 - 7]. Специальная литература по химмотологии, например, источник [8], отдельные вопросы раскрывает более глубоко. Число же публикаций в периодических изданиях и электронных ресурсах *Internet*, посвященных модифицированию состава ММ введением различных компонентов, является просто огромным.

Особенность подхода к изложению материала о присадках и механизме их действия, а также об эксплуатационных характеристиках масел определяется тем, что конечная цель исследования – это поиск предпосылок для разработки диагностического обеспечения ММ в рамках теории электрических методов. Любой метод неразрушающего контроля и диагностики основан на каком-либо физическом принципе, поэтому сведения о процессах в ММ здесь будут преподноситься либо с позиции их проявления в виде явлений электрической природы, либо внимание будет уделяться тем известным явлениям, которые могут быть применены с позиции теории уже известных методов электрического контроля и трибодиагностики.

### АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ ММ

В качестве основных функций СМ рассматривают следующие [1, 2]:

- снижение негативных последствий фрикционного взаимодействия для деталей трибосопряжений;
- снижение потерь на трение;
- предотвращение заедания в узлах трения;
- обеспечение теплоотвода из зоны трения, а также удаление продуктов изнашивания;
- защита поверхностей деталей от агрессивного воздействия внешней среды и уплотнение зазоров.

Более наглядно представления о функциональных свойствах (эксплуатационных характеристиках) ММ иллюстрируются рисунком 1 [1 - 9].

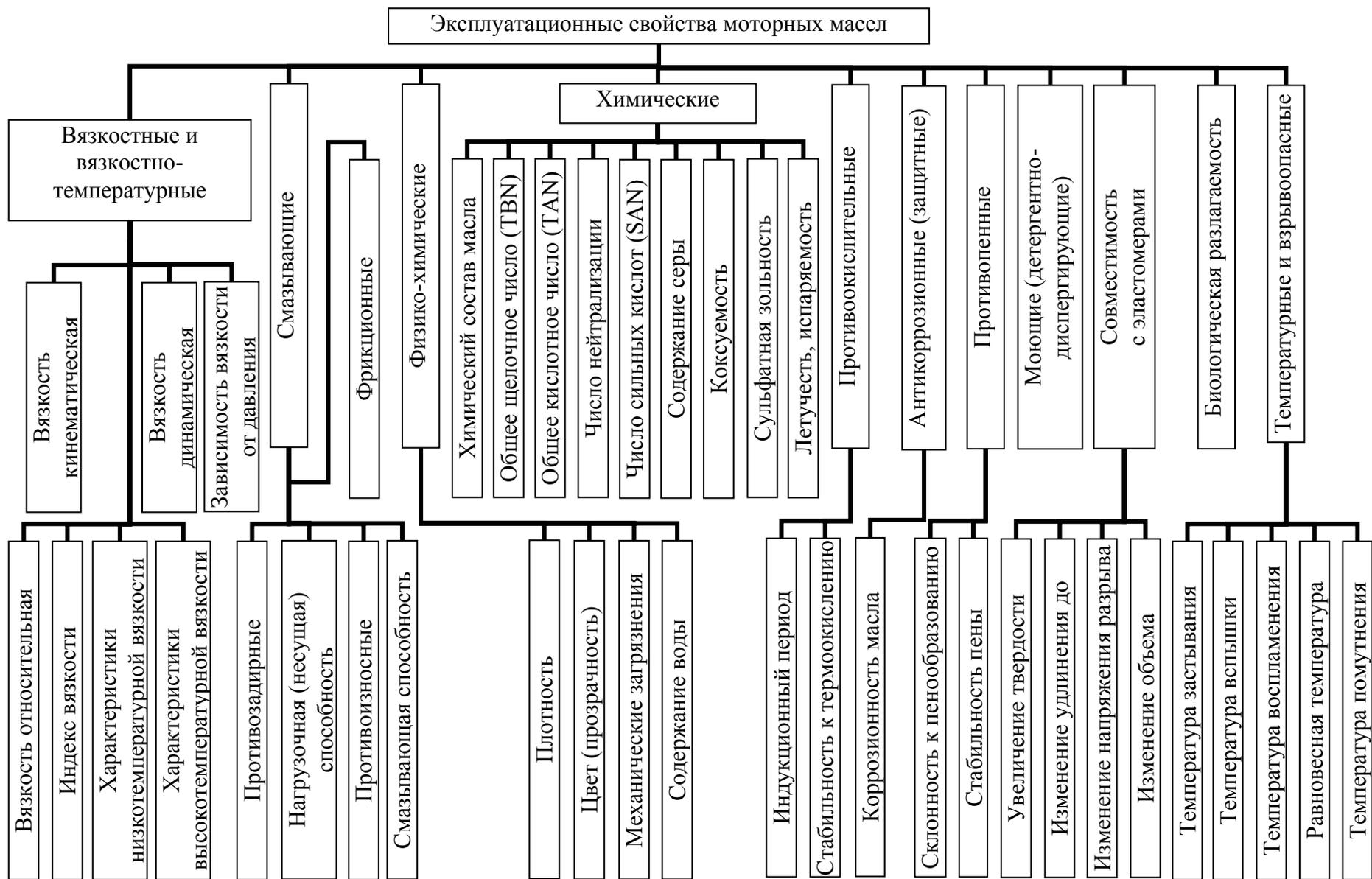


Рисунок 1 – Классификация эксплуатационных свойств моторных масел

Среди многочисленных свойств ММ в качестве одних из наиболее приоритетных выступают смазывающие свойства, которые выражаются комплексной характеристикой, обобщающей следующие понятия: противозадирные свойства; противоизносные свойства; смазывающая способность; нагрузочная (несущая) способность; фрикционные свойства.

#### ***Формирование противоизносных и противозадирных свойств масел.***

Под *противоизносными* свойствами масла понимают его способность препятствовать износу узлов трения за счет образования на трущихся поверхностях пленок различного состава и структуры, исключая непосредственный контакт трущихся деталей. Результатом введения таких присадок является снижение износа цилиндропоршневой группы до 30 %, расхода масла – также до 30 % и топлива – до 2 % [4].

Противоизносные свойства масел зависят от их вязкости, связаны со смазывающей способностью, со степенью загрязнения масла, с составом пакета присадок. Последний фактор является крайне важным при формировании противоизносных свойств, так как отдельные виды присадок, улучшая прочие свойства, могут приводить к повышению скорости изнашивания деталей (например, моющие присадки). Масла с высокими противоизносными и противозадирными свойствами необходимы, прежде всего, в тех случаях, когда при небольшой скорости относительного перемещения деталей трибосопряжения наблюдаются высокие удельные нагрузки, а также при существенной неидеальности геометрии рабочих поверхностей пар трения.

Различие между противоизносными и противозадирными присадками в достаточной степени следует считать условным. В работе [8] оно сводится к условиям фрикционного взаимодействия, в которых действует присадка: если химическое соединение вводится в СМ для снижения интенсивности изнашивания, протекающего в умеренных режимах трения, то присадка относится к классу противоизносных. В том случае, если эффективность присадки проявляется в экстремальных условиях (повышенные силовые нагрузки, температура и давление), то присадку относят к разряду *противозадирных*.

Для характеристики противоизносных свойств собственно масел особенно важна их способность формировать прочный смазочный слой, что возможно при обеспечении жидкостного режима смазки. Такой режим исключает непосредственный контакт поверхностей металлов, а возможное при таких условиях изнашивание объясняется, главным образом, усталостными разрушениями металлов.

Учитывая переменные режимы смазки в зонах трения различных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), можно сделать вывод, что реализовать жидкостную смазку, основываясь исключительно на реологических свойствах базовых масел, невозможно. В связи с этим, противоизносные, а также и противозадирные свойства масел обеспечиваются введением в них сернистых, хлористых и фосфорных соединений различных видов и в различных сочетаниях. Кроме того, применяют высокомолекулярные жирные кислоты и их эфиры. При этом образование устойчивых граничных слоев на металлических поверхностях в зоне трения при использовании, например, серосодержащих кислородных соединений объясняется активностью соединений типа сульфонов и сульфоксидов, имеющих значительные *дипольные моменты*.

Наиболее часто, по данным источника [7], применяют противоизносные присадки на основе цинкосодержащих солей дитиофосфорной кислоты, которые разлагаются при температуре ниже 200 °С. Противозадирные присадки обычно действуют независимо от температуры, образуя защитный слой при осаждении (например, дисульфид молибдена и графит). Противозадирные химически активные присадки, разлагающиеся при температурах выше 200 °С, в своей основе имеют алкил- и арилдисульфиды, дитиокарбаматы, хлорсодержащие углеводороды, диалкилводородные фосфиты и др. вещества. При этом нужно уточнить, что Н.К. Мышкин и М.И. Петроковец относят эти соединения к присадкам для сверхвысоких давлений как к отдельному классу, хотя во многих работах, например, в [5], противозадирные присадки и присадки для сверхвысоких давлений (*EP – extreme pressure additives*) отождествляются.

Действие противоизносных и противозадирных присадок в соответствии с [8] связано со следующими факторами (явлениями):

- *адсорбция присадок на границе раздела фаз;*
- *химическая активность молекул адсорбата* (присадки).

Указанные процессы следует рассматривать в совокупности, так как адсорбция (как физическая, так и хемосорбция) является первой стадией химической модификации поверхностных слоев деталей трибосопряжения.

*Эффективность адсорбции* присадки на поверхности металла определяется, прежде всего, дипольным моментом адсорбированных молекул. Увеличение значения дипольного момента обеспечивает более прочные поверхностные связи присадки с металлом, следовательно, противоизносные присадки должны обладать хорошей поляризуемостью в силовом поле. К дополнительным параметрам адсорбции относят период колебания адсорбированной молекулы в направлении, перпендикулярном поверхности, и теплоту адсорбции (энергию связи). Эти параметры в совокупности определяют среднюю продолжительность пребывания молекул присадки в адсорбированном состоянии.

*Реакционная способность* присадок зависит, во-первых, от их адсорбционной способности, так как степень заполнения поверхности металла молекулами адсорбента предопределяет скорость химических реакций. В дальнейшем химическая активность присадки определяется действием на молекулу адсорбента силового поля металла и энергетическими факторами: рост локального тепловыделения в зоне трения активизирует химические процессы, результатом чего является формирование модифицированного защитного слоя, заменяющего интенсивное изнашивание металла более «мягким» изнашиванием химических соединений, образующихся при разложении присадки. Продукты химических реакций накапливаются, прежде всего, на вершинах микронеровностей – на участках концентрации энергии. По своим свойствам модифицированные слои сильно отличаются от свойств металлов: они имеют относительно низкую температуру плавления, меньшую твердость, меньшую работу выхода электрона. Это и обеспечивает нивелирование микронеровностей, предотвращает сваривание микровыступов [4]. В связи с тем, что действие противоизносных присадок приводит к изменению (улучшению) шероховатости рабочих поверхностей, моторным маслам приписывают также *полирующие свойства*.

Перед тем, как окончательно сформулировать механизм действия противоизносных и противозадирных присадок, необходимо отметить один нюанс. В большинстве источников противоизносный эффект объясняется появлением на рабочих поверхностях трущихся деталей *сервоитного* (защитного) слоя, имеющего, в основном, химическую природу. Однако, в работах [4, 7] к противозадирным присадкам отнесены дисульфид молибдена и графит (коллоидные дисперсии), которые в работе [8] рассматриваются в качестве модификаторов трения (антифрикционная добавка). В то время, как эффективность химически активных противоизносных присадок с ростом температуры снижается, рассматриваемые добавки работают в расширенном температурном диапазоне. Таким образом, коллоидные дисперсии дисульфида молибдена и графита следует относить к группе *химически неактивных присадок*, а основной механизм их действия будет описан при рассмотрении антифрикционных присадок или модификаторов трения. Еще одним противоречием является то, в соответствии с [5] активные соединения серы, фосфора и хлора относят, наоборот, к противозадирным присадкам.

Анализ рассмотренных явлений позволяет описать следующий основной механизм действия противоизносных и противозадирных присадок (рисунок 2).

При введении в моторное масло полярных химических соединений, являющихся присадками рассматриваемой группы, происходит адсорбция молекул присадки на металлических поверхностях. Сформированные таким образом поверхностные слои уже сами по себе «экранируют» [2] или расклинивают [3, 9] рабочие поверхности трибосопряжения. Процесс физической адсорбции и хемосорбции интенсифицируется при повышении температуры. Дальнейший рост тепловыделений в зоне трения, прежде всего на

участках с ухудшенным качеством поверхностей, приводит к запуску химических реакций, результатом которых является формирование химически модифицированного защитного слоя.

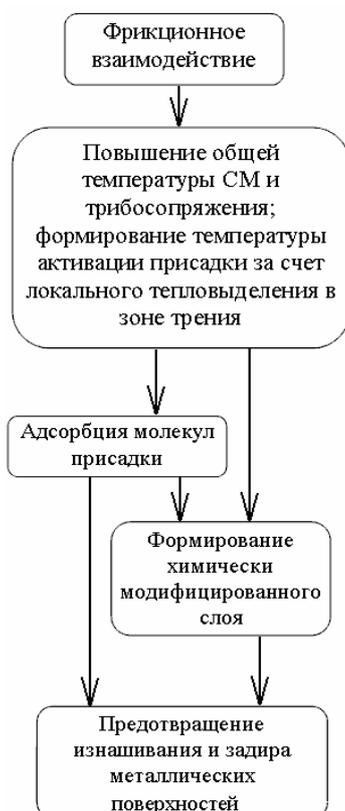


Рисунок 2 – Механизм действия противоизносных и противозадирных присадок

**Формирование несущей способности.**

Формирование смазочного слоя между деталями трибосопряжения в зависимости от условий, режимов и особенностей фрикционного взаимодействия протекает по-разному. В соответствии с этим рассматривают и различные способы *смазывания (lubrication)*. Например, при обеспечении жидкостного трения слой, разделяющий трущиеся поверхности, образуется в результате гидродинамического эффекта, и такое смазывание называют *гидродинамическим (hydrodynamic lubrication, full-fluid-lubrication)*. Очевидно, что в данном случае характеристикой СМ, которая определяет эффективность смазывания, является вязкость масла (в общем случае нужно рассматривать вязкостно-температурную характеристику, а также пьезокоэффициент вязкости).

Проблема оценки несущей способности смазочного слоя в настоящее время является в достаточной степени разрешенной в рамках электрического контроля. В качестве электрических явлений, которые следует рассматривать в данном аспекте, исследуются процессы электрического контактирования деталей трибосопряжений, а также изменения электрического сопротивления [10]. Кроме пассивных параметров фрикционного контакта исследуют также активные (различные виды ЭДС в зоне трения), однако последние на практике получили меньшее применение в силу сложности интерпретации результатов.

**Формирование смазывающей способности масел.**

В ДВС наблюдаются различные режимы смазки, и при переходе к граничной смазке в трибосопряжении снижение трения и изнашивания определяется уже не реологическими свойствами масла. *Граничное смазывание (boundary lubrication)* заключается в образовании на трущихся поверхностях адсорбированной пленки масла (*adsorption film of lubricant*) толщиной порядка 0,1 мкм [5].

Способность масла образовывать масляную пленку зависит от типа базовой основы масла и от наличия в нем поверхностно-активных полярных молекул, которые

адсорбируются на поверхности трения. Степень адсорбционной способности масел в данном аспекте называют *смазывающей способностью*, кроме того, применяются также термины «маслянистость» и «липкость» (*oiliness, tackiness*). Особо высокой липкостью – адсорбционной способностью – отличаются, как известно, растительные масла и их эфиры, жиры животного происхождения. Если рассматривать компоненты моторных масел, то можно отметить следующее.

Меньшей липкостью обладают парафиновые масла, и их смазывающие свойства проявляются только в условиях жидкостной смазки. Нафтеновые масла в большем количестве содержат полярные соединения (смолы, жирные и нафтеновые кислоты и пр.), в связи с чем обладают потенциально более высокой смазывающей способностью при граничной смазке.

Независимо от типа базовой основы, смазывающая способность моторного масла улучшается введением дополнительных компонентов. В работе [5] такие присадки названы «липкостными» (*tackiness agents*), но, пожалуй, это единственный источник из принятых авторами для текущего обзора, в котором приводится подобный термин. Таким образом, можно сделать вывод, что в большинстве работ не выделяется отдельная категория присадок, отвечающих за повышение смазывающей способности ММ.

С другой стороны, обращаясь к приведенному выше описанию принципа действия противоизносных присадок, можно установить тесную связь между противоизносными свойствами масел и смазывающей способностью, и констатировать многофункциональный характер противоизносных присадок. Действительно, как отмечено ранее, противоизносные свойства во многом определяются эффективностью адсорбции молекул присадки на поверхности трения. Причем, в умеренных силовых и температурных режимах снижение трения и изнашивания может быть обеспечено адсорбционной пленкой, то есть, смазочной способностью масла. Анализируя еще раз процессы, протекающие при действии противоизносных присадок (рисунок 2), можно сделать заключение, что проявление смазочной способности масла является условием и начальной стадией формирования противоизносных свойств. Другими словами, для обеспечения противоизносного эффекта масло должно обладать достаточной липкостью, чтобы молекулы адсорбента надежно закрепились на поверхности трения и при достижении критической температуры вступили в химическую реакцию с образованием уже твердого модифицированного слоя.

Механизм проявления смазочной способности масел, таким образом, заключается в образовании на поверхности трения защитного адсорбционного слоя, прочность которого зависит от адсорбционной эффективности компонентов масла. Отличием от начальной стадии механизма, показанного на рисунке 2, является, очевидно, меньшая роль тепловых эффектов в обеспечении липкости масла, так как смазывающая способность должна проявляться уже в начале фрикционного взаимодействия при сравнительно низкой температуре.

#### **Формирование фрикционных свойств.**

Для передвижения сопряженных поверхностей трибосопряжений необходима сила на преодоление трения. Эта сила называется силой трения (*frictional force*) и зависит от нагрузки и от свойств поверхностей. Каждый материал характеризуется индивидуальным коэффициентом трения (*friction coefficient*). При рассмотрении трения в узлах и механизмах автомобилей, основное внимание уделяется наружному трению твердых тел в местах их фрикционного контакта, хотя, при определенных условиях заметными могут быть и потери от внутреннего трения, определяемые вязкостью масел и условиями смазки деталей. Трение можно уменьшить разделением поверхностей слоем жидкого или пластичного смазывающего материала.

Расход энергии на преодоление трения составляет значительную часть общего расхода энергии, поэтому возможностям уменьшения трения уделяется большое внимание. По данным источника [5], потери энергии от трения в автомобиле распределяются следующим образом:

- 67 % при жидкостном режиме смазывания;
- 33 % при смешанном и граничном режимах смазывания.

Снижение потерь энергии на трение в двигателе на 50 % может позволить сэкономить от 3 до 17 % топлива.

Введение в моторное масло присадок, повышающих смазывающие свойства (липкость), или *модификаторов трения* приводит к уменьшению коэффициента трения, к упрочнению адсорбционной пленки на трущихся поверхностях деталей [5]. Таким образом, можно сделать вывод о связи фрикционных свойств масел со смазывающими, а также с противоизносными и противозадирными свойствами. При этом механизм действия присадок, очевидно, один и тот же, а разделение присадок по функциональному назначению является условным и зависит от аспекта, в котором рассматриваются свойства масел.

Одинаковыми также следует считать и механизмы проявления смазывающей способности, фрикционных, противоизносных и противозадирных свойств, связанные с образованием на рабочих поверхностях слоев различной природы, обеспечивающих снижение трения и интенсивности изнашивания. Тем не менее, в отдельных работах все-таки делаются акценты на некоторых особенностях, позволяющих более четко выделить модификаторы трения как отдельный класс присадок.

В работе [7] отмечается, что модификаторы трения отличаются от противоизносных и противозадирных присадок механизмом образования защитного слоя. Модификаторы трения содержат длинноцепные молекулы с полярными концевыми группами, например, производные жирных кислот, которые обеспечивают физическую адсорбцию на металлах.

И.А. Буяновский и А.В. Чичинадзе к модификаторам трения относят соли длинноцепочных органических кислот, дитиофосфаты и дитиокарбонаты молибдена, дисульфид молибдена, графит, политетрафторэтилен, порошки некоторых металлов. Причем действие дитиофосфатов и дитиокарбонатов молибдена является многофакторным: вследствие высокой адсорбционной активности данные соединения формируют на трущихся поверхностях многослойные (полимолекулярные) адсорбционно-хемосорбционные слои с низким сопротивлением сдвигу. При повышенных температурах рассматриваемые соединения разлагаются. Дитиокарбаматы молибдена, разлагаясь, осаждают на поверхностях серу и молибден, а в результате вторичных реакций образуется все тот же дисульфид молибдена, который относят и к противозадирным присадкам, и к модификаторам трения.

## **ВЫВОДЫ**

1 Проявление противоизносных свойств ММ связано со следующими процессами и явлениями:

- снижение трибоЭДС в зоне трения;
- изменение диэлектрической проницаемости масла;
- полирующее воздействие (улучшение шероховатости – процесс, эффективно оцениваемый электрорезистивными методами трибодиагностики);
- снижение работы выхода электрона на поверхностях.

2 Несущая способность ММ находит проявление в следующих процессах и явлениях:

- формирование высокого среднего электрического сопротивления зоны трения;
- снижение интенсивности процессов электрического контактирования деталей трибосопряжения;
- существенно меньшее значение ЭДС в зоне трения по сравнению со случаями граничного или сухого трения.

3 Смазочная способность моторных масел обеспечивается наличием полярных соединений, а для мониторинга изменения смазывающей способности можно исследовать изменение параметров комплексной диэлектрической проницаемости масла.

4 Проявление антифрикционных свойств ММ выражается теми же процессами и явлениями, что и проявление противоизносных свойств.

5 Проявление смазочных свойств ММ в целом связано с целым комплексом электрических процессов и явлений, что создает предпосылки для разработки диагностического обеспечения смазочных материалов, теоретической базой которого могут служить методы электрического контроля (электрофизические методы).

## **ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов [Текст] / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.
- 2 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
- 3 Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник [Текст] / Р.М. Матвиевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.: ил.
- 4 Венцель, С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 270 с.: ил.
- 5 Моторные масла [Текст] / Р. Балтенас, А.С.Сафронов, А.И.Ушаков, В.Шергалес. – Москва-Спб.: Альфа-Лаб, 2000. -272 с.
- 6 Гатченко, И. И. Автомобильные масла, смазки, присадки: Справочное пособие [Текст] / И.И. Гнатченко и др. – М.: ООО «Издательство АСТ»; СПб.: Издательство «Полигон», 2000. – 360 с.: ил.
- 7 Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
- 8 Теоретические основы химмотологии [Текст] / под. ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с., ил.
- 9 Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: Учеб. для вузов [Текст] / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374 с.: ил.
- 10 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

### **Пахолкин Евгений Васильевич**

к.т.н., доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация",  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419876,  
E-mail: [Eugene\\_P@bk.ru](mailto:Eugene_P@bk.ru)

### **Кузьмичев Денис Александрович**

аспирант кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация",  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419876

УДК 662.927

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, О.С. ПЕТРОВА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОМЕЩЕНИИ**

*Представлены результаты экспериментальных исследований применения устройства контроля и регулирования для поддержания заданной температуры воздуха в помещении лечебно-профилактического учреждения*

*Results of experimental researches of application of the device of the control and regulation for maintenance of the set temperature of air are submitted in treatment-and-prophylactic establishment*

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В ОрелГТУ разработано устройство, позволяющее в автоматическом режиме контролировать и регулировать температуру воздуха в помещении в зависимости от его назначения [1-4]. Такие устройства могут использоваться в различных производственных или бытовых помещениях, при этом одной из основных сфер их применения являются лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ), для которых согласно СНиП 41-01-2003 в помещениях различного назначения должна поддерживаться различная температура в диапазоне от 18 до 25 °С.

С целью проверки работоспособности данного устройства и оценки эффективности его применения возникла необходимость в проведении натуральных экспериментальных исследований, изложению предварительных результатов которых и посвящена настоящая работа.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И  
ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Объектом** экспериментальных исследований являлся опытный образец разработанного устройства контроля и регулирования, выполненный согласно рекомендациям [1-4]. Устройство имеет условную шкалу настройки на 8 уставок, которые соответствуют восьми значениям температуры в диапазоне от 18 до 25 °С, поддерживаемой в помещении.

**Место проведения исследований** – МЛПУ “Городская стоматологическая поликлиника № 1 г. Орла”, оборудованное однотрубной системой отопления. В здании были выбраны два соседних помещения (контрольное и исследуемое) в южном фасаде здания. Выбор указанных помещений осуществлялся из условия обеспечения максимально возможной их идентичности. Помещения равны по площади (17,5 м<sup>2</sup>), имеют по одному окну (площадь остекления 1,2 м<sup>2</sup>), находятся на одной ветви системы отопления, имея по одному отопительному прибору (6 секций).

В исследуемом помещении в соответствии со СНиП 41-01-2003 у отопительного прибора устанавливалось исследуемое устройство контроля и регулирования. Контрольное помещение устройства контроля и регулирования не имело (рисунок 1).

**Время проведения исследований** – период отопительного сезона 2008-2009 года (результаты, рассматриваемые в настоящей работе, получены в период с 13 ноября по 19 декабря 2008 г.).

**Контрольно-измерительное оборудование.** Для проведения исследования использовался комплекс для исследования параметров температурного режима помещения, оборудованного однотрубной системой отопления, в состав которого входит: вычислитель количества теплоты ВКТ-7, термометры сопротивления Pt 500 в количестве 4 штук; персональный компьютер [5]. Использовались четыре канала измерения температуры, при этом соответствующая установка датчиков (рисунок 1) обеспечивала возможность мониторинга температуры воздуха в исследуемом помещении ( $t_1$ ), в контрольном помещении ( $t_2$ ), температуры воздуха в месте установки устройства контроля и регулирования ( $t_3$ ) и температура наружного воздуха ( $t_4$ ). Значения температур  $t_1 - t_4$  регистрировались одновременно с частотой 1 час<sup>-1</sup> и сохранялись в архиве ВКТ-7, при этом погрешность определения температуры не превышала 0,1 °С. Предварительно производилась настройка устройства контроля и регулирования и программирование вычислителя количества теплоты.

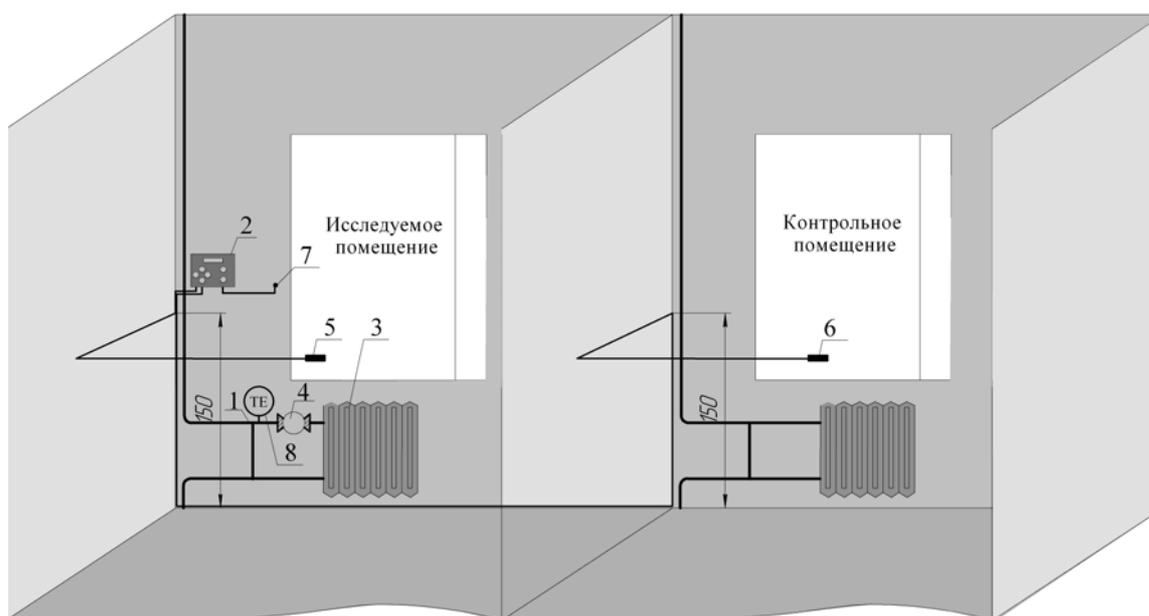


Рисунок 1 – Исследуемое и контрольное помещения

- 1 – трубопровод; 2 – вычислитель количества теплоты ВКТ-7;  
 3 – отопительный прибор; 4 – исследуемое устройство контроля и регулирования;  
 5 – датчик для измерения температуры воздуха в исследуемом помещении ( $t_1$ );  
 6 – датчик для измерения температуры воздуха в контрольном помещении ( $t_2$ );  
 7 – датчик для измерения температуры наружного воздуха ( $t_4$ );  
 8 – датчик для измерения температуры в месте установки устройства контроля и регулирования ( $t_3$ )

**Алгоритм проведения исследований** заключался в следующем:

- с помощью устройства контроля и регулирования путем поворота его крышки настраивалась требуемая уставка в соответствии с графиком проведения исследований (таблица 1);
- производился мониторинг четырех значений температуры ( $t_1 .. t_4$ ) в автоматическом режиме;
- по завершению периода мониторинга температуры при заданной уставке путем поворота крышки устройства контроля и регулирования осуществлялась его настройка на следующую уставку согласно таблице 1.

Таблица 1 – График проведения исследований в МЛПУ “Городская стоматологическая поликлиника №1 г. Орла”

Дата	№ уставки	Номинальное значение температуры, соответствующей уставке, °С
13.11.2008 – 18.11.2008	3	20
18.11.2008 – 25.11.2008	4	21
25.11.2008 – 02.12.2008	5	22
02.12.2008 – 08.12.2008	6	23
08.12.2008 – 13.12.2008	7	24
13.12.2008 – 19.12.2008	8	25

**Результаты экспериментальных исследований**

В результате экспериментальных исследований в течение 5 - 7 суток на каждой уставке исследуемого устройства проведен мониторинг значений температуры в исследуемом и контрольном помещениях, в месте установки устройства контроля и регулирования и температуры, а также температуры наружного воздуха. Диаграммы изменения температур  $t_1 - t_4$  от времени, построенные по 865 значениям указанных температур, представлены на рисунке 2.

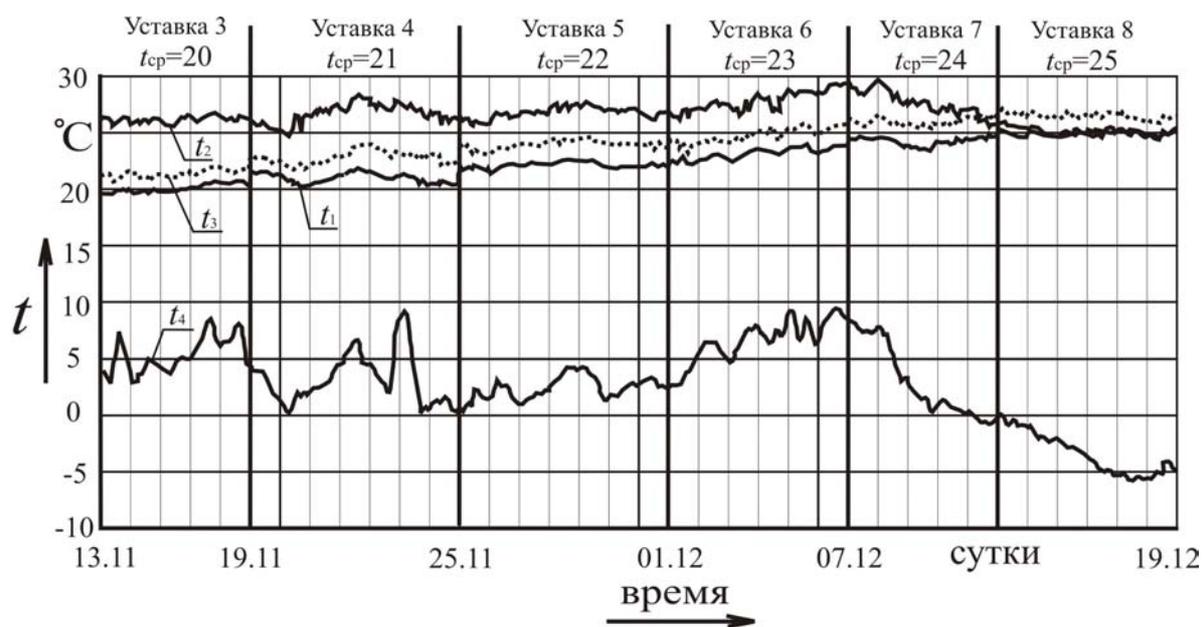


Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований температур в исследуемом и контрольном помещении, в месте установки устройства контроля и регулирования и температуры наружного воздуха

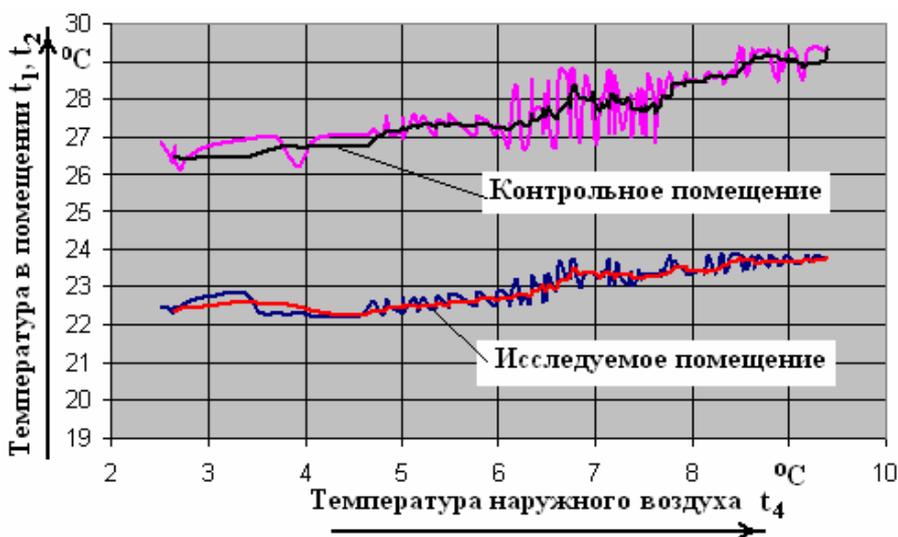
**АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Анализ полученных экспериментальных данных проводился по следующим направлениям:

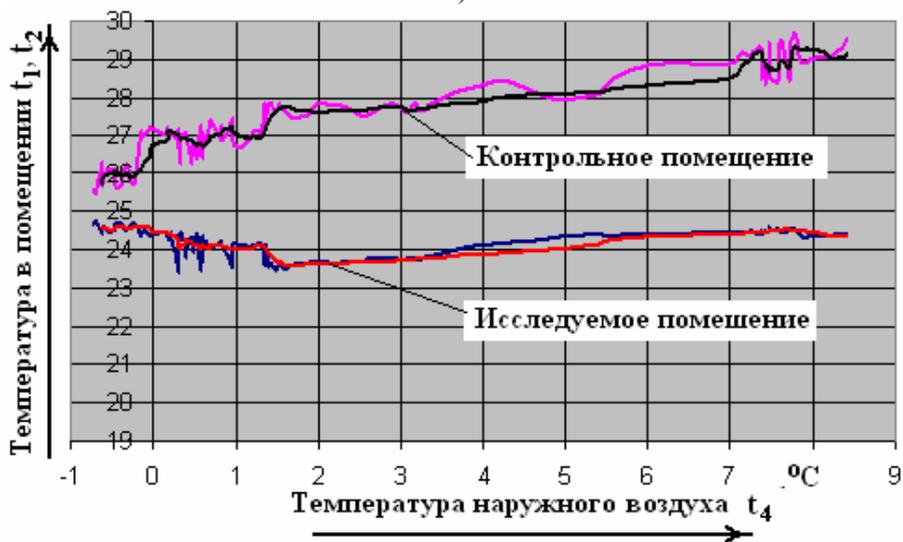
- оценивалась работоспособность и эффективность исследуемого устройства контроля и регулирования температуры;
- оценивалась точность поддержания температуры воздуха в помещении с помощью разработанного устройства контроля и регулирования температуры;
- оценивалось соответствие температуры в помещении (в середине помещения на высоте 1,5 м от пола) температуре в месте установки устройства контроля и регулирования;

**Анализ работоспособности и эффективности исследуемого устройства контроля и регулирования температуры.**

Анализ характера изменения с течением времени значений температуры в исследуемом и контрольном помещениях, с одной стороны, в температуры наружного воздуха, с другой стороны (рисунок 2), показывает, что при каждой уставке в исследуемом помещении, оснащённом устройством контроля и регулирования, температура воздуха в меньшей степени зависит от температуры наружного воздуха. На рисунке 3 представлены иллюстрирующие высказанное наблюдение примеры диаграмм зависимостей температуры в исследуемом и контрольном помещениях от температуры наружного воздуха для двух уставок, полученные путем исключения из диаграмм рисунка 2 переменного времени. Для каждой из уставок представлены по две диаграммы, одна из которых включает все экспериментальные точки, а вторая – значения, усредненные для выявления тренда по шести точкам.



а)



б)

Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости температуры в исследуемом ( $t_1$ ) и контрольном ( $t_2$ ) помещениях от температуры наружного воздуха ( $t_4$ ) при уставках № 6 (а) и № 7 (б)

Из диаграмм рисунка 3а видно, что повышение температуры наружного воздуха от 2,4 до 9,4 °С (на 5 °С) при уставке № 6 привело к увеличению температуры в контрольном помещении от 26,3 до 29,4 °С (на 3,2 °С), в то время как температура в исследуемом

помещении изменялась в диапазоне от 22,3 до 23,9 °С (лишь на 1,6 °С). Аналогичные диаграммы рисунка 3б показывают, что падение температуры наружного воздуха от 8,4 до -0,7 °С (на 9,1 °С) при уставке № 7 приводит к понижению температуры в контрольном помещении с 29,5 до 25,5 °С (на 4,0 °С), в то время, как температура в исследуемом помещении при отсутствии монотонного тренда изменялась в диапазоне от 24,7 до 23,5 °С (лишь на 1,2 °С).

С целью статистического подтверждения работоспособности исследуемого устройства контроля и регулирования для экспериментальных значений температуры в исследуемом помещении при каждой уставке устройства определялись среднее арифметическое значение температуры в помещении ( $\bar{t}_1$ ), среднее квадратическое отклонение этой температуры ( $S_{t_1}$ ), а также максимальное  $t_{1\max}$  и минимальное  $t_{1\min}$  значения этой температуры. Полученные результаты представлены в строках 2-5 таблицы 2, где для сравнения указаны также номинальные значения температуры воздуха в помещении  $t_{1\text{ном}}$  для каждой уставки (строка 1).

Таблица 2 – Статистические оценки значений температура воздуха в исследуемом помещении при различных уставках устройства контроля и регулирования температуры

№	Уставка	3	4	5	6	7	8
1	$t_{1\text{ном}}, \text{°C}$	20	21	22	23	24	25
2	$\bar{t}_1, \text{°C}$	20,08	20,98	22,11	23,12	24,23	24,93
3	$S_{t_1}, \text{°C}$	0,36	0,43	0,27	0,50	0,35	0,22
4	$t_{1\min}, \text{°C}$	19,51	20,19	21,28	22,23	23,43	24,57
5	$t_{1\max}, \text{°C}$	20,75	21,82	22,66	23,90	24,76	25,35
6	$ t_{1\text{ном}} - \bar{t}_1 , \text{°C}$	0,08	0,02	0,11	0,12	0,23	0,07
7	$ t_{1i} - t_{1\text{ном}} _{\max}, \text{°C}$	0,75	0,82	0,72	0,9	0,76	0,43
8	$E_{0,95} = t_{0,95} \cdot S_{t_1}, \text{°C}$	0,72	0,86	0,54	1,00	0,70	0,44
9	$ (\bar{t}_1 \pm E_{0,95}) - t_{1\text{ном}} _{\max}, \text{°C}$	0,80	0,88	0,65	1,12	0,93	0,51

По данным рисунка 2 и таблицы 2 видно, что изменение уставки на устройстве контроля и регулирования температуры приводит к изменению среднего значения температуры  $\bar{t}_1$  в помещении (строка 2 таблицы), при этом достаточно существенный разброс значений температуры при каждой уставке, характеризуемый средним квадратическим отклонением  $S_{t_1}$  (строка 3 таблицы), требует статистического доказательства правомерности гипотезы о том, что изменение уставки приводит к значимому изменению температуры в помещении.

Для доказательства гипотезы проводилась проверка значимости различия средних арифметических значений температуры воздуха в исследуемом помещении  $\bar{t}_1$  для серий значений температуры, соответствующих каждой уставке. Для этого определялись моменты распределения разности средних арифметических значений температуры для каждой пары соседних уставок:

$$G_{3-4} = (\bar{t}_1)_3 - (\bar{t}_1)_4; G_{4-5} = (\bar{t}_1)_4 - (\bar{t}_1)_5; G_{5-6} = (\bar{t}_1)_5 - (\bar{t}_1)_6;$$

$$G_{6-7} = (\bar{t}_1)_6 - (\bar{t}_1)_7; G_{7-8} = (\bar{t}_1)_7 - (\bar{t}_1)_8. \quad (1)$$

$$S_{G3-4} = \sqrt{\frac{S_{t_{13}}^2}{n_3} + \frac{S_{t_{14}}^2}{n_4}}; S_{G4-5} = \sqrt{\frac{S_{t_{14}}^2}{n_4} + \frac{S_{t_{15}}^2}{n_5}}; S_{G5-6} = \sqrt{\frac{S_{t_{15}}^2}{n_5} + \frac{S_{t_{16}}^2}{n_6}};$$

$$S_{G6-7} = \sqrt{\frac{S_{t_{16}}^2}{n_6} + \frac{S_{t_{17}}^2}{n_7}}; S_{G7-8} = \sqrt{\frac{S_{t_{17}}^2}{n_7} + \frac{S_{t_{18}}^2}{n_8}}. \quad (2)$$

На основании расчетов по формулам (1) и (2), получено;

$$G_{3-4} = -0,894; G_{4-5} = -1,132; G_{5-6} = -1,015; G_{6-7} = -1,104; G_{7-8} = -0,706.$$

$$S_{3-4} = 0,046; S_{4-5} = 0,039; S_{5-6} = 0,046; S_{6-7} = 0,052; S_{7-8} = 0,037.$$

Задавшись доверительной вероятностью  $\alpha$ , находились значения квантиля распределения вероятности  $t_\alpha$  и проверялось условие  $|G| \leq t_\alpha \cdot S_G$  для каждой пары серий. Установлено, что по всем парам соседних уставок различие средних арифметических значений температур в сериях признано статистически значимым даже для доверительной вероятности 0,997 (практически единичная вероятность), что подтверждает высказанную выше гипотезу и, следовательно, работоспособность исследуемого устройства контроля и регулирования.

**Анализ точности поддержания температуры воздуха в помещении с помощью разработанного устройства контроля и регулирования температуры**, выполненный по данным таблицы 2, показывает, что:

– отклонения среднего значения температуры при каждой уставке устройства контроля и регулирования  $\bar{t}_1$  от номинального значения температуры  $t_{\text{НОМ}}$  лежат в интервале от 0,02 °С (при уставке № 4) до 0,23 °С (при уставке № 7), что не превышает 1 %;

– предельные отклонения температуры воздуха в помещении при каждой уставке устройства контроля и регулирования ( $t_{1\text{min}}$  или  $t_{1\text{max}}$ ) от номинального значения температуры  $t_{\text{НОМ}}$  лежат в интервале от 0,43 °С (при уставке № 8) до 0,82 °С (при уставке № 4), что не превышает 3,9 %;

– доверительный интервал изменения температуры в помещении  $E_{0,95}$  при каждой уставке устройства контроля и регулирования, рассчитанный для доверительной вероятности 0,95, составляет от 0,44 °С (при уставке № 8) до 1,00 °С (при уставке № 6), что не превышает 4,3 %;

– с вероятностью 0,95 отклонения температуры воздуха в помещении при каждой уставке устройства контроля и регулирования ( $\bar{t}_1 \pm E_{0,95}$ ) от номинального значения температуры  $t_{\text{НОМ}}$  лежат в интервале от 0,51 °С (при уставке № 8) до 1,12 °С (при уставке № 4), что не превышает 4,9 %.

Если принимать во внимание, что для каждой уставки мониторинг проводился в течение нескольких (5 - 7) суток при существенном изменении неучтенных внешних факторов (температура наружного воздуха изменялась от -5,8 до 9,2 °С) и внутренних условий (помещение находилось в условиях реальной эксплуатации, туда входил и выходил персонал, двери могли открываться на различное время в помещении могли проводиться плановые работы и т.п.), полученные результаты свидетельствуют о высокой точности поддержания температуры в исследуемом помещении (предельные отклонения практически не превысили 1 °С).

**Анализ зависимости между температурой воздуха в исследуемом помещении и температурой в месте установки устройства контроля и регулирования.**

Очевидно, что температурное поле внутри помещения распределено не равномерно, имея максимум температуры вблизи отопительного прибора. Особенность контроля температуры с помощью исследуемого устройства заключается в том, что требуемое

(номинальное) значение температуры в помещении соотносится к его середине и определяется на высоте 1,5 м от пола, а датчик температуры устройства контроля устанавливается непосредственно у отопительного прибора. Указанная особенность должна приводить к систематической погрешности в определении температуры при контроле, которую необходимо учитывать при настройке устройства регулирования.

Для определения соответствующей зависимости между температурой в исследуемом помещении  $t_1$  и температурой в месте установки устройства контроля и регулирования  $t_3$  на основании полученных экспериментальных данных исследовалась **регрессия**  $t_3$  на  $t_1$ . Для этого анализировался весь массив пар экспериментальных значений  $t_1$  и  $t_3$ , полученный на протяжении 36 суток при различных уставках исследуемого устройства и значениях температуры наружного воздуха (865 пар значений). На рисунке 4 экспериментальные данные представлены точками в декартовой системе координат ( $t_3, t_1$ ).

Характер расположения экспериментальных точек свидетельствует о наличии линейной регрессии. Проведенные расчеты по методу наименьших квадратов позволили получить:

$$t_1 = 0,96 \cdot t_3 - 0,61, \quad (3)$$

при этом коэффициент линейной корреляции оказался равным 0,98, а среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от уравнения регрессии составило 0,33 °С.

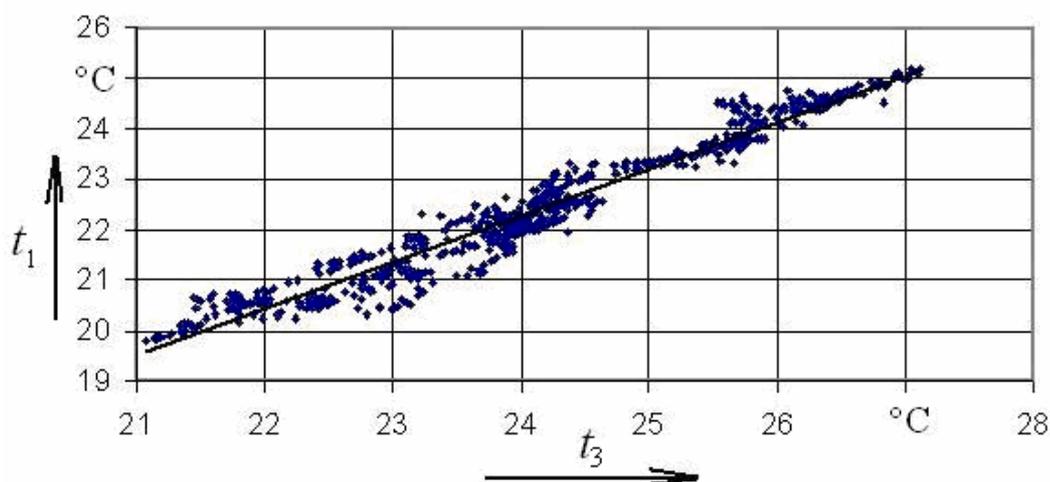


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость температуры воздуха в исследуемом помещении  $t_1$  и температуры в месте установки устройства контроля и регулирования  $t_3$

Анализ полученного уравнения регрессии с учетом найденных значений коэффициентов и оценок позволяет сделать следующие выводы:

– между температурой в помещении  $t_1$  и температурой в месте установки устройства контроля и регулирования  $t_3$  существует тесная (практически функциональная) линейная зависимость;

– коэффициент уравнения регрессии при  $t_3$  близок к единице (0,96), что указывает на наличие в исследуемом диапазоне температур только аддитивной систематической погрешности, равной 0,61 °С, при оценке температуры в помещении устройством контроля, расположенным в непосредственной близости от отопительного прибора;

– при контроле температуры в помещении с использованием устройства контроля и регулирования, расположенного в непосредственной близости от отопительного прибора при настройке этого устройства необходимо учесть аддитивную поправку - 0,61 °С.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные натурные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного авторами оригинального устройства автоматического контроля и регулирования температуры воздуха в помещениях, оборудованных однетрубной системой отопления. Исследования показали эффективность применения этого устройства при достижении высоких метрологических характеристик поддержания температуры в помещении на требуемом уровне.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Патент № 2302031 РФ, МКИ G 05 D 23/02. Регулятор температуры / С.А. Чистович, С.П. Петров, А.И. Суздальцев, О.С. Петрова. – Оpubл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
- 2 Патент № 75065 РФ на полезную модель МПК G 05 B 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.07.2008, Бюл. № 20.
- 3 Патент № 79192 РФ на полезную модель МПК G 05 B 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.12.2008, Бюл. № 35.
- 4 Подмастерьев, К.В. Устройство регулирования температуры воздуха в помещениях / К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова // Датчики и системы, 2008. – № 6. – С.14-18.
- 5 Петрова О.С. Комплекс для исследования параметров температурного режима помещения оборудованного однетрубной системой отопления: В сб. энерго - и ресурсосбережение XXI век - Материалы шестой международной научно-практической интернет-конференции, Орел.: Орел ГТУ, 2008. – с. 44-47.

#### **Подмастерьев Константин Валентинович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Приборостроение, метрология и сертификация"  
Тел. (4862) 419821  
E-mail: [asms-orel@mail.ru](mailto:asms-orel@mail.ru)

#### **Петрова Ольга Сергеевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирантка кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"  
Тел. (4862) 419876  
E-mail: [lavanda777@bk.ru](mailto:lavanda777@bk.ru)

Н.В. ДАВЫДОВА, С.Ф. КОРНДОРФ, Т.И. НОГАЧЁВА

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ДОБАВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРА ДВУХПОЛЮСНИКА МЕТОДОМ ДВУХ ВОЛЬТМЕТРОВ

*В статье описан выбор оптимального значения добавочного сопротивления при измерении параметра двухполюсника методом двух вольтметров, при котором ошибка измерения минимальна.*

*In article the choice of optimum value of additional resistance is described at measurement of parametre of a two-pole by a method of two voltmeters at which the measurement error is minimum.*

В [1] рассмотрен метод измерения сопротивления двухполюсника с помощью двух вольтметров, преимущество которого заключается в возможности измерения сопротивлений в широком диапазоне частот. При реализации этого метода используется схема, приведённая на рисунке 1.

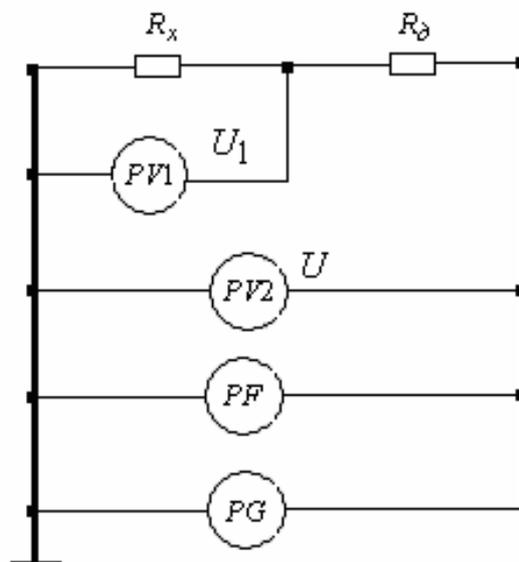


Рисунок 1- Схема измерения сопротивления двухполюсника.

Схема питается от генератора синусоидальных колебаний  $PG$ , частота которых измеряется частотомером  $PF$ , а напряжение – вольтметром  $PV2$ . Вольтметр  $PV1$  измеряет падение напряжения на измеряемом сопротивлении.

При таком методе измерения сопротивление двухполюсника определяется выражением:

$$R_x = R_0 \frac{U_1}{U - U_1}, \quad (1)$$

где  $U_1$  – напряжение, измеряемое вольтметром  $PV1$ , на исследуемом двухполюснике;

$U$  – общее напряжение, измеряемое вольтметром  $PV2$  на последовательном соединении двухполюсника и добавочного сопротивления  $R_0$ .

Определение значения сопротивления двухполюсника можно проводить при любом значении добавочного сопротивления, однако погрешность измерения зависит от значения

$R_\partial$ , поэтому целесообразно определить значение  $R_\partial$ , которому соответствует минимальная погрешность измерения. Если погрешность вольтметра характеризуется относительной приведённой погрешностью

$$\delta_{U_{max}} = \frac{\Delta_{max}}{U_{max}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{max}$  – максимальная абсолютная погрешность, а статистическое распределение погрешности  $\Delta$  неизвестно, то приходится использовать для оценки точности результата измерения сопротивления значение  $\delta_{U_{max}}$ . Максимально возможное значение результатов измерения в соответствии с выражением (2) определяется:

$$R_x + \Delta R_{max} = R_\partial \frac{U_1 + \Delta U_{max}}{(U - \Delta U_{max}) - (U_1 + \Delta U_{max})} = R_\partial \frac{U_1 + \Delta U_{max}}{U - U_1 - 2\Delta U_{max}}. \quad (3)$$

Следовательно, максимальная погрешность определения сопротивления может достигать значения

$$\Delta R_{max} = (R_x + \Delta R_{max}) - R_x = R_\partial \frac{U_1 + \Delta U_{max}}{U - U_1 - 2\Delta U_{max}} - R_\partial \frac{U_1}{U - U_1}. \quad (4)$$

Пренебрегая малыми значениями  $\Delta U$  в сумме  $(U + \Delta)$ , это выражение можно привести к виду:

$$\Delta R_{max} \approx R_\partial \frac{(U + U_1)\Delta U_{max}}{(U - U_1)^2}. \quad (5)$$

Тогда относительная погрешность определения сопротивления равна:

$$\delta_{R_{max}} = \frac{\Delta R_{max}}{R_x} = \frac{(U + U_1)\Delta U_{max}}{(U - U_1)^2} \frac{(U - U_1)}{U_1} = \frac{U + U_1}{U - U_1} \frac{\Delta U_{max} U}{U U_1}. \quad (6)$$

Введя параметр  $\gamma = \frac{U_1}{U} = \frac{R_x}{R_x + R_\partial}$ , получим:

$$\delta_{R_{max}} = \frac{1 + \gamma}{(1 - \gamma)\gamma} \frac{\Delta U_{max}}{U}. \quad (7)$$

Для определения экстремального значения функции приравняем нулю её производную:

$$\frac{\partial \delta_{R_{max}}}{\partial \gamma} = \frac{(1 - \gamma)\gamma - (1 + \gamma)(1 - 2\gamma)}{(1 - \gamma)^2 \gamma^2} = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8), получаем значение  $\gamma = 0,414$ , которое, как показывают исследования, соответствует минимальной погрешности измерения сопротивления. Подставляя найденное значение  $\gamma$  в выражение (6) получаем оптимальное значение добавочного сопротивления:

$$R_{\partial_{opt}} = R_x \frac{1 - (\sqrt{2} - 1)}{\sqrt{2} - 1} = 1,415R_x, \quad (9)$$

при котором значение  $\delta_{R_{max}}$  минимально:

$$\delta_{R_{max}} = \frac{\sqrt{2}}{(2 - \sqrt{2})(\sqrt{2} - 1)} \frac{\Delta U_{max}}{U} = 5,828 \frac{\Delta U_{max}}{U}. \quad (10)$$

Для получения результатов измерения с наименьшей погрешностью в соответствии с выражением (10) необходимо предварительно измерить исследуемый двухполюсник при любом значении добавочного сопротивления, лежащем в диапазоне возможных значений измеряемого сопротивления. По результатам предварительного измерения необходимо определить оптимальное значение добавочного сопротивления. И затем провести измерения при полученном оптимальном значении добавочного сопротивления.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Калинин, В.В. Способ и устройство для измерения сопротивления водных электролитов. / Калинин В.В., Казак А.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. – № 8. – Том 74. – С. 46-48.

**Давыдова Надежда Владимировна**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,  
Тел. (0862)419876  
E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

**Корндорф Сергей Фердинандович**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (0862)419876  
E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

**Ногачёва Татьяна Ивановна**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел. (0862)419876  
E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

УДК 004:658.011.56

О.В. ПИЛИПЕНКО, Ю.А. ДЕМИНА, Е.Г. ДЕМИНА, А.В. ДЕМИН

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ**

*На основе использования термоэлектрических элементов в автоматизированной системе по контролю манометрических терморегуляторов решается задача термоэлектрического термостатирования воздушной и жидкостной среды барокамеры, в которую погружают контролируемые приборы, что позволяет ускорить и повысить качество их контроля.*

*On the basis of usage of a thermoelectric unit in the automated system under the control of manometrical temperature regulators the task thermoelectric thermal constancy the air and liquid environment of a pressure chamber in which immerse controllable instruments that allows to accelerate and raise quality of their control dares.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время важнейшую роль в проведении качественного контроля приборов играют условия контроля. Исследования, отраженные в данной статье, направлены на решение проблемы ускорения и повышения качества контроля манометрических приборов, таких как терморегуляторы с чувствительным элементом и сильфоном. Решение этой проблемы связано с проведением комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов теплообмена в специальной барокамере с целью достижения необходимой температуры её воздушной среды, влияющей непосредственно на скорость и качество контроля, погружаемых в барокамеру контролируемых приборов.

### **ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ**

Контроль качества прибора осуществляется следующим образом: чувствительный элемент контролируемого прибора погружают в жидкостной термостат, в котором поддерживают постоянную температуру, а на сильфон прибора воздействуют давлением в соответствии со значениями контрольных точек.

При этом температура сильфона контролируемого прибора должна соответствовать нормальным условиям контроля и быть выше температуры жидкостного термостата. В противном случае под воздействием избыточного давления в барокамере может произойти недопустимая деформация сильфона, которая может вызвать изменение механических характеристик контролируемого прибора. Поэтому необходимо в барокамере поддерживать постоянную температуру в пределах нормы.

Но при быстром подъеме и сбросе давления происходят недопустимые скачки температуры воздуха в барокамере. Отсюда следует, что быстроты и качества контроля приборов невозможно достичь без стабилизации температурных режимов в барокамере. Поэтому предложен подход, основанный на том, что заданные температурные режимы в барокамере (воздушном термостате) и в жидкостном термостате устанавливаются с помощью термоэлектрических модулей, выделяющих или поглощающих тепловую энергию на одной из их сторон (пластин) в зависимости от величины и направления протекающего через них электрического тока. Схема специальной барокамеры с встроенными термоэлектрическими устройствами (ТЭУ) для стабилизации температурных режимов представлена на рисунке 1. Термоэлектрические устройства построены на основе серийно выпускаемых термоэлектрических модулях (ТЭМ).

Управление температурными режимами барокамеры представляет собой систему автоматического регулирования (рисунок 2), в которой роль исполнительных устройств

играют термоэлектрические модули. В зависимости от направления и силы проходящего через них электрического тока осуществляется нагрев или охлаждение термостатируемой среды барокамеры.

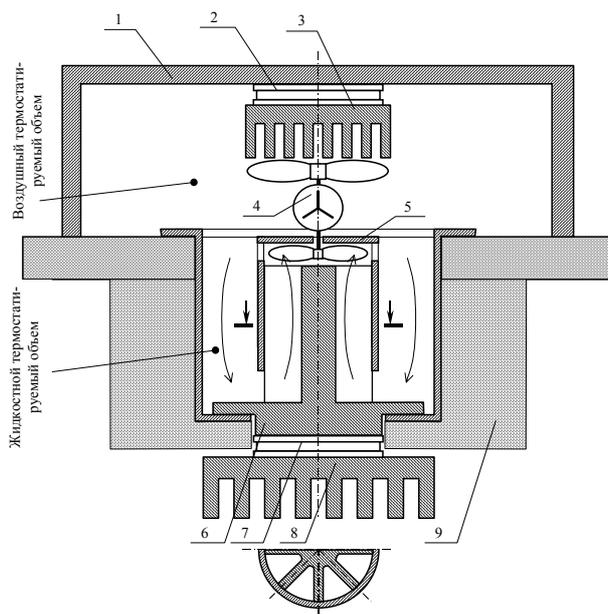


Рисунок 1 – Схема барокамеры с использованием термоэлектронных модулей

- 1 – крышка камеры; 2 – термоэлектрический модуль; 3 – радиатор;
- 4 – двигатель циркуляционного насоса; модуль жидкостного термостата;
- 5 – кожух теплообменника; 6 – радиатор теплообменника; 7 - термоэлектрический модуль;
- 8 – радиатор; 9 – теплоизоляция.

Значение температуры в барокамере  $T$  подается на устройство управления, которое вырабатывает управляющее воздействие  $\tau$  на источник тока. Регулируемая величина тока  $I$  с выхода источника поступает на термоэлектрический модуль через управляемый коммутатор, изменяя тепловой поток  $Q_0$ , отдаваемый модулем в объем камеры. Температура камеры  $T$  отслеживается датчиком температуры.

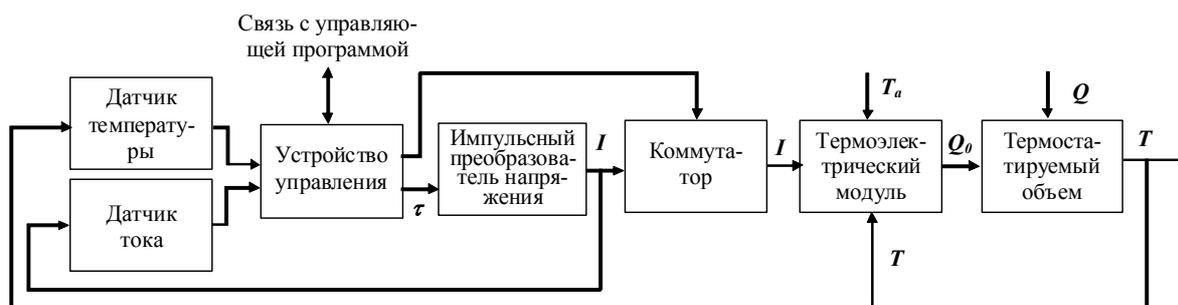


Рисунок 2 – Структурная схема управления температурными режимами барокамеры

- $\tau$  – управляющее воздействие;  $I$  – величина тока;  $Q_0$  – тепловой поток от модуля Пельтье;
- $Q$  – тепловой поток, вносимый в результате нагнетания или сбрасывания давления и тепловой поток от стенок камеры;  $T$  – температура барокамеры;
- $T_a$  – температура окружающей среды.

Таким образом, установление нужной температуры в барокамере достигается за счет регулирования силы и направления тока, проходящего через термоэлектрический модуль Пельтье.

Алгоритм контроля терморегуляторов представлен схемой на рисунке 3. Контролируемые терморегуляторы 1 помещают в воздушную среду 2 барокамеры 3, а их чувствительные элементы опускают в жидкостной термостат 4. Датчики температуры 10, 11 отслеживают температуру в барокамере и в жидкостном термостате, а датчик давления 12 - в

барокамере. Через аналого-цифровые преобразователи 13, 14, 15 и блок сопряжения 16 значения этих параметров передаются в программу управления. Программа управления принимает решение об изменении давления воздуха в барокамере по определенному закону в соответствии с модификацией прибора и подает соответствующий сигнал через блок регулирования давления 5, соединенный электрическими линиями с электроклапанами 6 с дросселями 7, подключенными к пневматическим линиям подачи и сброса воздуха. В момент замыкания контактной группы терморегулятора программа определяет соответствующую температуру срабатывания терморегулятора и делает вывод о его пригодности.

Программа управления также связана с цифро-аналоговыми преобразователями 17, 18 с высокоточными выходами. Для стабилизации температуры воздушной среды и температуры холодильной ванны программа управления изменяет значение тока, протекающего через термоэлектрические модули 19, 20. В зависимости от величины и направления тока происходит нагрев или охлаждение теплообменников 21, 22, при этом теплообменники 23, 24 помещаются во внешнюю среду. Вентиляторы 25, 26, 27, 28 предназначены для усиления теплообмена.

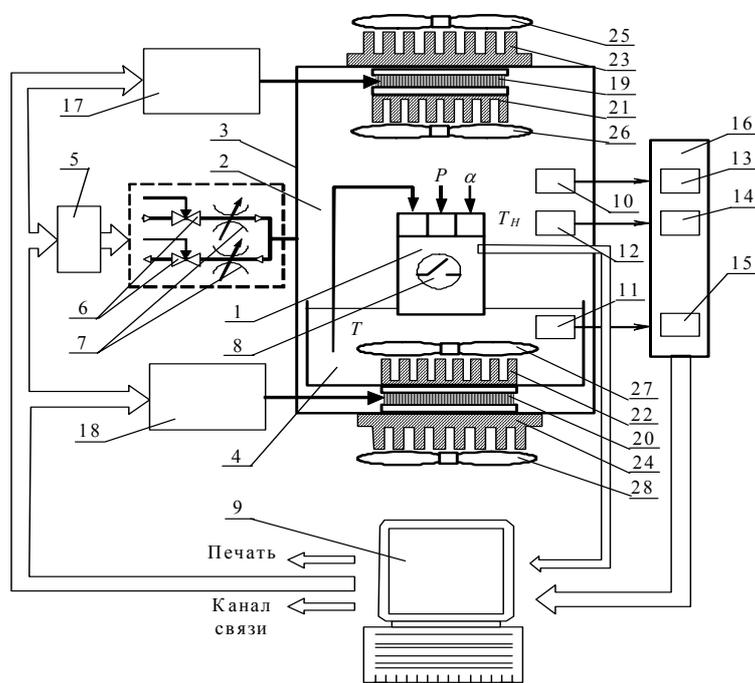


Рисунок 3 – Схема управления системой тестирования терморегулятора

Оптимальный подбор элементов конструкции, а также определение закона устойчивого регулирования величиной тока через ТЭМ, определяет круг задач связанных с стабилизацией температурных режимов.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА

Решение задачи стабилизации температурного режима воздушной среды барокамеры связана с моделированием процессов теплообмена в сложной технической системе, которая состоит из большого числа разнородных элементов с различными размерами и формой, находящимися во взаимодействии между собой и окружающей средой.

При моделировании температурных полей сложных технических систем температурные поля элементов или частей системы обычно заменяют их средними температурами с разной степенью детализации.

Наиболее общими уравнениями, которыми описываются процессы тепло и массопереноса в сплошных средах, являются уравнение баланса и законы сохранения в интегральной форме.

Интегральное уравнение баланса теплоты для выделенного тела элемента системы или его части объемом  $V_i$  с ограничивающей поверхностью  $S_i$  [1]:

$$\int_{V_i} \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} \cdot dV_i = -\oint_{S_i} j_i \cdot dS_i + \int_{V_i} \phi_i \cdot dV_i, \quad (1)$$

где  $j_i$  – плотность теплового потока, выходящего из  $i$ -го тела;

$\phi_i$  – плотность интенсивности внутренних источников теплоты в  $i$ -м теле;

$T_i$  – температура  $i$ -го тела;

$V_i$  – объем  $i$ -го тела, ограниченного поверхностью  $S_i$ .

Считая распределение температуры в каждом  $i$ -м теле изотермическим с температурой  $T_i$ , введем следующие преобразования [1]:

$$\int_{V_i} \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} \cdot dV_i = C_i \cdot \frac{dT_i}{dt}, \quad C_i = \int_{V_i} \rho_i \cdot c_i \cdot dV_i, \quad (2)$$

где  $T_i$ ,  $C_i$  – средняя температура и теплоемкость  $i$  – го объема;

Полная интенсивность внутренних источников теплоты:

$$\Phi_i(t) = \int_{V_i} \phi_i \cdot dV_i, \quad (3)$$

Полный тепловой поток, пронизывающий поверхность  $i$ -го тела  $S_i$ , складывается из тепловых потоков, поступающих от остальных тел:

$$J_i = \oint_{S_i} j_i \cdot dS_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N J_{i,j}, \quad (4)$$

Тогда уравнение теплового баланса запишется в следующем виде:

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N J_{i,j} = \Phi_i(t), \quad (5)$$

где тепловые потоки описываются соотношениями вида:

$$J_{i,j} = g_{i,j} \cdot (T_i - T_j), \quad (6)$$

где  $g_{i,j}$  – тепловая проводимость между  $i$ -м и  $j$ -м телом моделируют теплопередачу кондукцией, конвекцией и излучением между телами.

Считая распределение температуры в каждом теле системы, заключенной в объеме барокамеры, изотермическим, и учитывая, что теплообмен с поверхности тел осуществляется через воздушную среду барокамеры преимущественно конвективным путем, получим систему уравнений баланса теплоты:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{datT} \cdot \frac{dT_{datT}}{dt} + g_{datT,V} \cdot (T_{datT} - T_V) = 0, \end{array} \right. \quad (7.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{ob} \cdot \frac{dT_{ob}}{dt} + g_{ob,V} \cdot (T_{ob} - T_V) = 0, \end{array} \right. \quad (7.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{st} \cdot \frac{dT_{st}}{dt} + g_{st,V} \cdot (T_{st} - T_V) + g_{st,air} \cdot (T_{st} - T_{air}) = 0, \end{array} \right. \quad (7.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_V(t) \cdot \frac{dT_V}{dt} + g_{V,ob} \cdot (T_V - T_{ob}) + \\ + g_{V,st} \cdot (T_V - T_{st}) + g_{V,r1} \cdot (T_V - T_{r1}) = \Phi_V(t) \end{array} \right. , \quad (7.4)$$

где  $g_{i,j} = \alpha_{i,j} \cdot S_{i,j}$  – теплопроводность между  $i$ -м и  $j$ -м телом при конвективной теплопередаче;

$\alpha_{i,j}$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности  $S_{i,j}$  раздела  $i$ -го и  $j$ -го тел.

Интенсивность внутреннего источника теплоты  $\Phi_V$  в воздушном объеме барокамеры связана с процессом нагнетания или сброса воздуха, которое сопровождается изменением термодинамических параметров воздушной среды, заключенной в объеме камеры

$$\Phi_V(t) = \frac{dM_V}{dt} \cdot \varphi_V(t), \quad (8)$$

где  $\frac{dM_V}{dt}$  - массовый расход воздуха через проходное сечение клапана, кг/с;

$\varphi_V$  – плотность потока выделяемой при этом тепловой энергии, Дж/кг с.

Наибольший интерес представляет моделирование процессов с высокими скоростями изменения давления, которым свойственен подкритический режим истечения воздуха через проходное сечение клапана [2]:

$$\frac{dM_V}{dt} = \begin{cases} \mu_N \cdot f_N \cdot \frac{p_N}{\sqrt{T_N}}, & \text{нагнетание} \\ -\mu_C \cdot f_C \cdot \frac{p_V}{\sqrt{T_V}}, & \text{сброс} \end{cases}; \quad (9)$$

$$\varphi_V = \begin{cases} c_p \cdot T_N - c_v \cdot T_V, & \text{нагнетание} \\ R \cdot T_V, & \text{сброс} \end{cases}; \quad (10)$$

$$C_V(t) = c_v \cdot M_V(t), \quad (11)$$

где  $\mu_N, \mu_C$  - поправки, учитывающие как конструкцию клапана, так и физические свойства воздуха;  
 $f_N, f_C$  - проходное сечение клапана при нагнетании и сбросе, м<sup>2</sup>;  
 $p_N, T_N, p_V, T_V$  - параметры среды истечения воздуха при нагнетании и сбросе, Па, К;  
 $c_p, c_v$  - удельные теплоемкости воздуха при постоянном давлении и объеме соответственно, Дж/кг·К;

$R$  - газовая постоянная для воздуха, Дж/кг·К;

$C_V$  - полная теплоемкость воздушной среды барокамеры, Дж/К.

Термодинамические параметры воздуха, заключенного в объеме камеры, можно связать, например, уравнением состояния идеального газа

$$p_V = \frac{M_V}{V} \cdot R \cdot T_V. \quad (12)$$

Система уравнений (7 – 11) представляет математическую модель термодинамических процессов, протекающих в объеме барокамеры, при высоких скоростях изменения давления.

Для описания процессов, связанных с термостабилизацией воздушного объема барокамеры, необходимо совместное решение рассмотренной модели с дополнительной системой уравнений, описывающей процессы теплопередачи от управляемого источника тепловой энергии к радиатору теплообменника термоэлектрического устройства (ТЭУ), помещенного в камеру.

Существует класс технических систем, конструкция которых может рассматриваться как осесимметричная, что дает возможность ставить ей в соответствие одномерные теплофизические модели. Конструкция термоэлектрического термостата воздушной среды барокамеры позволяет ставить ей в соответствие одномерную тепловую модель составного стержня с разрывными теплофизическими характеристиками, описанную например в [1].

Согласно уравнению (2) каждому выделяемому объему  $V_i$  ставится в соответствие узел –  $i$  с температурой  $T_i$  и теплоемкостью  $C_i$ .

Преобразование правой части уравнения (1) зависит от расположения узлов в выделяемых объемах.

Конечные объемы преимущественно располагают так, чтобы их границы совпадали с границами разрыва теплофизических характеристик, а узлы выделяемых объемов совмещают с границами, разделяющими соседние объемы. Такое размещение автоматически

обеспечивает выполнение граничных условий четвертого рода – равенства тепловых потоков и температур на границе разнородных материалов.

На рисунке 5 представлены температурные точки одномерной модели ТЭУ.

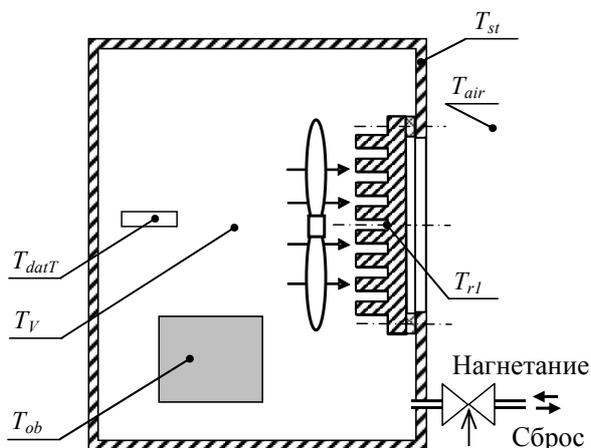


Рисунок 4 - Температурные точки термостатируемой барокамеры

$T_r$  – температура основания ребер радиатора теплообменника;  $T_{st}$  – стенки камеры (усредненная температура);  $T_V$  – воздуха в барокамере;  $T_{ob}$  – термостатируемый объект;  $T_{air}$  – окружающий воздух;  $T_{датT}$  – датчика температуры.

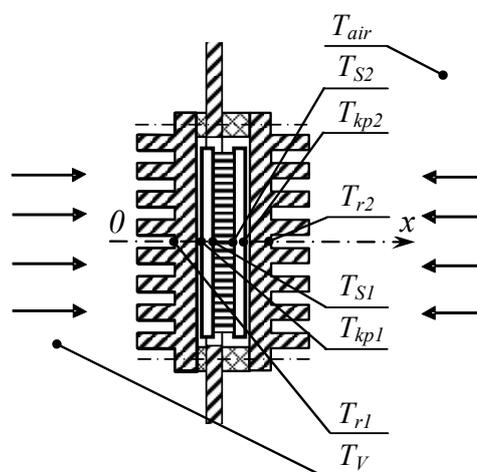


Рисунок 5 – Температурные точки ТЭУ

$T_{r1}, T_{r2}$  – основание ребер радиаторов;  $T_{kp1}, T_{kp2}$  – поверхности керамических пластин ТЭМ;  $T_{S1}, T_{S2}$  – спаи ТЭМ;  $T_V$  – воздуха в барокамере;  $T_{air}$  – окружающий воздух.

И соответствующая система уравнений для выбранной одномерной тепловой модели ТЭУ имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{r1} \cdot \frac{dT_{r1}}{dt} + g_{r1,V} \cdot (T_{r1} - T_V) + g_{r1,kp1} \cdot (T_{r1} - T_{kp1}) = 0, \quad (13.1) \\ C_{kp1} \cdot \frac{dT_{kp1}}{dt} + g_{kp1,r1} \cdot (T_{kp1} - T_{r1}) + g_{kp1,S1} \cdot (T_{kp1} - T_{S1}) = 0, \quad (13.2) \\ C_{S1} \cdot \frac{dT_{S1}}{dt} + g_{S1,kp1} \cdot (T_{S1} - T_{kp1}) + g_{S1,S2} \cdot (T_{S1} - T_{S2}) = \\ = 0,5 \cdot R \cdot I^2(t) - \bar{\alpha} \cdot T_{S1} \cdot I(t) \quad (13.3) \\ C_{S2} \cdot \frac{dT_{S2}}{dt} + g_{S2,S1} \cdot (T_{S2} - T_{S1}) + g_{S2,kp2} \cdot (T_{S2} - T_{kp2}) = \\ = 0,5 \cdot R \cdot I^2(t) + \bar{\alpha} \cdot T_{S2} \cdot I(t) \quad (13.4) \\ C_{kp2} \cdot \frac{dT_{kp2}}{dt} + g_{kp2,S2} \cdot (T_{kp2} - T_{S2}) + g_{kp2,r2} \cdot (T_{kp2} - T_{r2}) = 0, \quad (13.5) \\ C_{r2} \cdot \frac{dT_{r2}}{dt} + g_{r2,kp2} \cdot (T_{r2} - T_{kp2}) + g_{r2,air} \cdot (T_{r2} - T_{air}) = 0, \quad (13.6) \end{array} \right.$$

где  $C_{r1}, C_{r2}$  – теплоемкости радиаторов, Дж/К;

$C_{S1}, C_{S2}$  – теплоемкости спаев ТЭМ и полупроводникового вещества, участвующего в теплообмене, Дж/К;

$C_{kp1}, C_{kp2}$  – теплоемкость керамических пластин теплосъемников, Дж/К;

$R$  – электрическое сопротивление ТЭМ, Ом;

$\bar{\alpha}$  – температурный коэффициент Зеебека, Вт/К·А;

$I(t)$  – величина тока, проходящего через ТЭМ, А.

При кондуктивной теплопередачи тепловая проводимость участка между узлами одномерной модели имеет вид:

$$g_{i,j} = \left( \int_{x_i}^{x_j} \frac{dx}{\lambda(x) \cdot S(x)} \right)^{-1}, \quad (14)$$

где  $\lambda(x)$  – коэффициент теплопроводности, Вт·м/К;  $S(x)$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

К системам уравнений (7) и (13) можно применять матричные формы записи для создания SPICE-моделей, что значительно облегчает моделирование поведения температурных полей с помощью различных пакетов прикладных программ. Полученные системы уравнений позволяют решить поставленные задачи как методами численного решения так и методами теории автоматического регулирования.

## **ВЫВОДЫ**

В последнее время проведен большой объем теоретических и экспериментальных исследований полупроводниковых термоэлектрических элементов и охлаждающих устройств на их основе. Но задача, направленная на определение режима, обеспечивающего заданный или некоторый экстремальный временной ход температуры на спаях пластин термоэлектрических элементов, представлена результатами, полученными для немногих частных случаев. Одна из таких задач решена в работе [5]. Однако, рассматриваемую в данной статье задачу термоэлектрического термостатирования объекта, помещенного в специальную барокамеру, можно отнести к малоисследованным задачам.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вайнштейн, В.Д. Низкотемпературные холодильные установки / [Текст] Вайнштейн В.Д., Канторович В.И. - М.: "Изд-во Пищевая промышленность", 1972. - 342 с, стр. 199.
2. Мадера, А. Г. Моделирование теплообмена в технических системах [Текст] / А. Г. Мадера. – М.: НО Научный Фонд «Первая исследовательская лаборатория имени академика В. А. Мельникова», 2005. – 208 с., ил.
3. Герц Е. В. Расчет пневмоприводов [Текст] : справ. пособие / Е. В. Герц, Г.В. Крейнин. - М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
4. Покорный, Е.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств [Текст] / Е.Г. Покорный, А.Г. Щербина – Л.: Наука, 1969. – 205 с.
5. Методика расчета и выбора параметров термоэлектрических термостатов: дис. канд. техн. наук: 01.04.14 / Ф.Ю. Тахистов - Защищена 22.05.2007. - Санкт-Петербург, 2007. - 174с.

### **Пилипенко Ольга Васильевна**

Орловский государственный технический университет г. Орел  
Доцент кафедры "Прикладная математика и информатика", к.т.н  
Тел.: +7(4862)41-98-34  
e-mail: kef@ostu.ru

### **Демина Елена Григорьевна**

Орловский государственный технический университет г. Орел  
Доцент кафедры "Прикладная математика и информатика", к.т.н  
Тел.: +7(4862)41-98-34  
e-mail: kef@ostu.ru

### **Демина Юлия Александровна**

Орловский государственный технический университет г. Орел  
Зав. лабораторией кафедры "Прикладная математика и информатика"  
Тел.: +7(4862)41-98-34  
e-mail: kef@ostu.ru

### **Демин Александр Викторович**

Инженер, Межрегиональное хранилище, г. Орел  
Тел.: +7(4862)77-65-43  
e-mail: maxv@orel.ru

С.Н. ПЛОТНИКОВ

## **ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО МЕТОДА**

*В статье рассмотрен цифровой виброметр, применяемый для контроля прочностных параметров строительных конструкций.*

*In article, it is described digital vibrometer, applied to the control of parameters of durability of building designs.*

Развитие и внедрение вибрационных методов диагностики технического состояния строительных конструкций требует оснащения измерительных лабораторий и служб ОТК соответствующими средствами контроля. Применение для этих целей стандартных средств измерений, выпускаемых нашей приборостроительной промышленностью, приводит к необходимости обработки получаемых виброграмм для определения частоты и логарифмического декремента затухания изгибных колебаний. Кроме того, требуется дальнейшая довольно трудоемкая аналитическая обработка результатов данных для получения косвенных оценок контролируемых параметров, характеризующих качество конструкций, включая графическую интерпретацию зависимостей "интегральный параметр прочности – динамический параметр". Приборная реализация всех этих измерительных и аналитических операций затруднялась тем, что не были известны строгие аналитические зависимости, связывающие контролируемые интегральные параметры с динамическими характеристиками строительных конструкций. Такая возможность появилась благодаря выявлению фундаментальной закономерности, которая позволила связать параметры прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных конструкций с основной частотой их колебаний [1].

Перспективным является также проведение испытаний с использованием продольных колебаний длинномерных конструкций, частота которых значительно частоты поперечных колебаний [2]. С помощью такого способа можно испытывать конструкции переменной жесткости.

Для реализации всех этих способов вибрационного контроля необходима измерительная аппаратура, обеспечивающая высокоточное измерение частоты и логарифмического декремента затухания колебаний, с представлением результатов в виде интегральных параметров качества изделий. В связи с этим проведена разработка цифрового фотоэлектрического виброметра, позволяющего повысить точность и линейность характеристики преобразования вибрационных колебаний в электрические сигналы, снизить влияние помех на достоверность результатов контроля и автоматизировать процесс измерений.

Применение виброметра для экспресс-контроля различных параметров железобетонных изделий обеспечивается функциями, реализуемыми в блоке обработки данных. Так, при экспериментальных исследованиях прочности и жесткости конструкций достаточно реализовать точное измерение частоты или периода колебаний. При допусковом контроле нужно учитывать параметры эталонной конструкции и сравнивать их с аналогичными параметрами испытываемого образца, а при проведении испытаний на пластинках-моделях вводить соответствующие коэффициенты геометрического подобия т. п.

Практически цифровой блок обработки информации реализован программным путем на микросхеме фирмы *Altera* типа *AT89S8252/LCC*, представляющей собой электрически программируемую логическую матрицу (ЭПЛИС). При программировании структура ПЛИС условно разделена на функциональные узлы, выполняющие простейшие преобразования в соответствии с функциональной схемой, показанной на рисунке 1. При этом предусмотрена

возможность изменения вида выполняемых функций для разных областей применения виброметра изменением алгоритма работы без замены микросхемы.

Обработка информации при проведении вибрационного контроля качества строительных конструкций выполняется следующим образом.

При появлении импульсов, поступающих от аналоговой части виброметра после ударного возбуждения вибрационных колебаний, срабатывает триггер пуска, синхронизирующий блок задержки начала цикла измерения. Вследствие этого цифровое измерение длительностей периодов колебаний начинается с задержкой на 80...100 мс после ударного возбуждения контролируемого изделия. Такая задержка необходима для установления резонансных колебаний в контролируемой железобетонной конструкции, причем ее длительность может устанавливаться с клавиатуры в диапазоне от 10 до 150 мс.

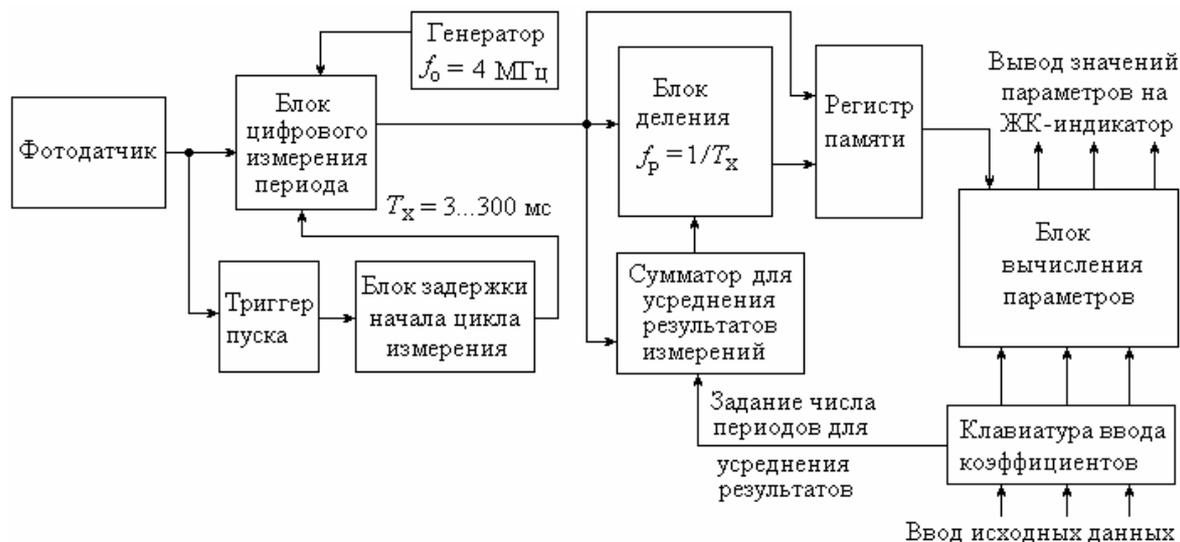


Рисунок 1 – Функциональная схема универсального виброметра

Цифровое измерение длительностей импульсов, поступающих от фотодатчика, выполняется путем их заполнения опорной частотой  $f_0 = 4 \text{ МГц}$ , задаваемой кварцевым генератором импульсов. Полученные значения кодов от блока измерения периода поступают на блок усреднения результатов измерений и блок вычисления резонансной частоты. Количество периодов, используемых для получения средней частоты колебаний, можно устанавливать с клавиатуры прибора в диапазоне  $N = 1 \dots 8$ .

Полученные значения длительностей импульсов, периода и резонансной частоты колебаний запоминаются регистром и используются для вычисления прочностных параметров. В случае допускового контроля с клавиатуры в блок вычисления параметров вводятся граничные значения резонансной частоты и логарифмического декремента затухания колебаний, а также пороговые значения механических параметров конструкции (жесткости, прочности и трещиностойкости). Практически исходные данные для допускового контроля однотипных изделий можно вводить один раз, например, перед началом серии испытаний, либо заранее записывать их в перепрограммируемую микросхему памяти устройства.

Требуемые значения параметров и применяемых при их расчете коэффициентов можно вводить с клавиатуры при использовании виброметра для любых прочностных испытаний железобетонных конструкций, с представлением результатов операций на жидкокристаллическом индикаторе.

Цифровой блок обработки информации реализует следующие функции:

– контроль основной резонансной частоты  $f_p$  механических колебаний строительных конструкций (в герцах), который реализуется посредством цифрового измерения длительности периода основных колебаний  $T_p$  и автоматического вычисления обратного

отношения  $f_p = 1/T_p$ . При этом в качестве временного параметра  $T_p$  можно использовать мгновенную ( $T_p = T_{Xj}$ ) или среднюю ( $T_p = \sum T_{Xj} / N$ , при  $N = 2...8$ ) длительность измеряемого периода изгибных или продольных колебаний конструкции;

– вычисление относительного логарифмического декремента затухания резонансных колебаний по отношению разности и суммы длительностей импульсов, формируемых фотодатчиком в начале и в конце каждого периода колебаний, измеряемого в цифровой форме, по выражению

$$\delta \approx 2(\Delta T_{j+1} - \Delta T_j) / \pi(\Delta T_{j+1} + \Delta T_j);$$

– автоматическое вычисление максимального прогиба  $W_0$  (в миллиметрах) конструкции балочного типа при контрольной нагрузке  $P_W$  по формуле:

$$W_0 = 0,0032 \cdot T_p^2 P_W / m,$$

причем значения погонной массы конструкции  $m = (200...350)$  кг/м и удельной контрольной нагрузки  $P_W = (20...100)$  кН/м нужно вводить как исходные данные перед началом контроля жесткости, а для расчета использовать измеренное значение периода  $T_p$  резонансной частоты колебаний;

– автоматическое вычисление относительного максимального прогиба  $W_0$  (в миллиметрах) конструкции балочного типа по расчетной формуле:

$$W_0 = W_{0Э} P_W m_{Э} f_{PЭ}^2 / P_{WЭ} m f_P^2,$$

причем значения максимального прогиба эталонной конструкции  $W_{0Э}$  (в мм), контрольные нагрузки эталонной  $P_{WЭ}$  и испытуемой  $P_W$  конструкций в кН/м, погонные массы контролируемой  $m$  и эталонной  $m_{Э}$  конструкций, а также частота колебаний эталонной конструкции  $f_{PЭ}$  (в герцах) должны вводиться с клавиатуры как исходные данные перед началом цикла измерения.

В этой формуле параметры  $P_W$ ,  $P_{WЭ}$ ,  $m$ ,  $m_{Э}$  – это исходные данные, а параметры  $f_P$ ,  $f_{PЭ}$  и  $W_{0Э}$  определяются экспериментально по результатам предварительных измерений.

При сравнении контролируемой конструкции с ее моделью применяют соотношения параметров:

$$f_{PЭ} \approx (1...10) f_P; \quad P_{WЭ} \approx (0,1...1,5) P_W; \quad m_{Э} \approx (0,1...1,5) m.$$

Для расширения функциональных возможностей прибора предусмотрено автоматическое вычисление ряда других контролируемых параметров, в том числе:

– жесткости конструкции  $W_{0С}$  (в миллиметрах прогиба при контрольной нагрузке  $P_{1С}$ );

– трещиностойкости по нагрузке  $P_{21С}$ , кН/м, при которой появляются трещины в конструкциях первой категории по трещиностойкости;

– трещиностойкости по нагрузке  $P_{22С}$ , кН/м, при которой появляются трещины в конструкциях второй категории по трещиностойкости;

– прочности под нагрузкой  $P_{3С}$ , кН/м, при которой деформации изгиба нарастают после 30 минут выдержки конструкции под нагрузкой.

Допустимые значения параметров  $W_0 \leq (1...20)$  мм,  $P_{21С} \approx (50...80)$  кН,  $P_{22С} \approx (60...90)$  кН;  $P_{3С} \approx (120...150)$  кН,  $P_{22}$ ,  $P_3$  и значения эталонной частоты  $f_{PЭ}$  и частоты  $f_{2Э}$  эталонного образца при статической нагрузке  $P_{21}$  должны вводиться как исходные данные перед началом проведения испытаний.

Для проведения допускового контроля, который обычно выполняется посредством измерения частоты  $f_{2С}$  резонансных колебаний конструкции под нагрузкой  $P_{21}$ , предусмотрено вычисление коэффициента вида  $K = f_{2Э}^2 / f_{2С}^2$  и вывод на индикаторное табло четырех видов разных параметров.

Значения контролируемых параметров рассчитываются по формулам:

$$W_{0C} = W_0 \times K; \quad P_{21C} = P_{21} \times K; \quad P_{22C} = P_{21} \times K; \quad P_{3C} = P_3 \times K.$$

В виброметре предусмотрена возможность автоматического вычисления нагрузки  $P_{ТР,С}$ , кН/м, при которой в контролируемой строительной конструкции появляются трещины.

Для расчета этой нагрузки используется формула

$$P_{ТР,С} = P_{ТР}/K,$$

в которой используют значение контрольной нагрузки по трещиностойкости для данных плит  $P_{ТР}$ , кН/м, и значение относительного коэффициента  $K = f_{2Э}^2 / f_{2С}^2$ , вычисляемого по результатам измерения частоты колебаний эталонной и серийной плит при стандартной нагрузке  $P \approx 0,85 P_{ТР}$ , кН/м.

В блоке обработки предусмотрено автоматическое вычисление преднапряжения арматуры  $\sigma_0$  в железобетонных плитах дорожного покрытия по формуле:

$$\sigma_0 = 2(\pi^2 E \cdot I / \rho^2 - 39,24 m \cdot f_p^2 \cdot l^2) / \Sigma A_A,$$

где  $E$  – модуль упругости бетона, Па;  $I$  – момент инерции поперечного сечения, м<sup>4</sup>;  $f_p$  – резонансная частота колебаний в ненагруженном состоянии, Гц;  $l$  – длина пролета плиты, м;  $m$  – погонная масса, кг/м;

$\Sigma A_A$  – суммарная площадь арматуры в верхней и нижней зонах плиты.

Погонная масса  $m$  и изгибная жесткость  $E \cdot I$  совместно с проектными параметрами  $l$  и  $\Sigma A_A$  должны вводиться как исходные данные. Частота  $f_p$  измеряется виброметром в процессе контроля.

Прибор может определять преднапряжения в центрально армированных железобетонных конструкциях балочного типа с предварительно введенными значениями погонной массы  $m$ , (кг/м), длиной пролета  $l$ , (м) и суммарной площади напрягаемой арматуры  $\Sigma A_A$ , (м<sup>2</sup>) по формуле:

$$\sigma_0 = (f_0^2 - f_p^2) 8ml^2 / \Sigma A_A,$$

где  $f_0$  – основная частота колебаний ненапряженной конструкции по нормативным документам;

$f_p$  – измеренная частота колебаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода. / В.И. Коробко. Том 1. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 396 с.

2 Слюсарев, Г.Н. Модифицированный вибрационный метод интегральной оценки качества железобетонных изделий с применением продольных колебаний / Г.Н. Слюсарев. – Изв. Вузов. Строительство, 1995. – № 5 – 6. – С. 122-125.

**Плотников Сергей Николаевич**

инженер лаборатории кафедры радиотехники и электроники  
Академия ФСО России,  
г. Орёл Телефон: 8(4862)41-99-47

УДК 531.43/.46;539.62;621.891;621.004.6;621.89

Е.В. ПАХОЛКИН, В.В. МИШИН

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ**

*В работе рассматриваются методические вопросы диагностирования крупногабаритных опор жидкостного трения. Изложен подход к комплексированию диагностической технологии. В качестве диагностических рассматриваются параметры электрического контактирования, виброперемещение и объемная температура подшипника.*

*In work methodical questions of diagnosing of large-sized support of a liquid friction are considered. The approach to complexification of diagnostic technology is stated. The diagnostic parameters – electric contacting, vibrodisplacement and volume temperature of the bearing are considered.*

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Аварийный отказ подшипников жидкостного трения (ПЖТ) технологического оборудования на предприятиях металлургической промышленности приводит к огромным потерям, связанным с простоем, а также с ремонтом оборудования. Эффективным решением проблемы является предотвращение аварийных отказов, прогнозирование состояния ПЖТ, а также выполнение ремонтных работ в рамках плановых мероприятий, что сопряжено с меньшими экономическими и трудозатратами.

В большинстве случаев единственным видом контроля, применяемым при диагностировании ПЖТ, является тепловой контроль, который, как известно, при высокой достоверности отличается значительной инерционностью. Применение акустических методов, как правило, ограничено мероприятиями по пуско-наладке оборудования и на практике мало используется при построении систем функционального диагностирования.

Решением задачи функционального диагностирования крупногабаритных ПЖТ может являться комплексирование диагностической технологии, заключающееся в использовании диагностических параметров различной природы. Не смотря на то, что методы акустического и теплового контроля в трибодиагностике в настоящее время являются уже классическими, существенно повысить достоверность диагностирования можно при использовании теоретических положений электрорезистивной трибодиагностики [1]. В частности, применение параметра «нормированное интегральное время электрического контактирования» (НИВ) обеспечивает высокую чувствительность при оценке состояния трибосопряжений, отсутствие инерционности при формировании сигналов о состоянии ПЖТ.

Техническая реализация измерительных каналов виброперемещения, температуры и параметров электрического контактирования представляется сравнительно несложной инженерной задачей. Однако, совместное использование названных измерительных каналов требует разработки специального методического обеспечения процесса диагностирования ПЖТ, что является более сложной научной задачей.

**ОБЪЕКТЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Объектами контроля являются ПЖТ электродвигателей пятиклетьевого стана ЦПиО ПХЛ ОАО «Северсталь».

Весь стан включает в себя пять пар валков, каждая пара валков управляется двумя двигателями. Габариты двигателей определяют конструктивную особенность привода каждой пары валков: один из двигателей располагается выше и имеет более длинный вал (так называемый, верхний вал), другой двигатель с более коротким валом располагается ниже (рисунок 1).

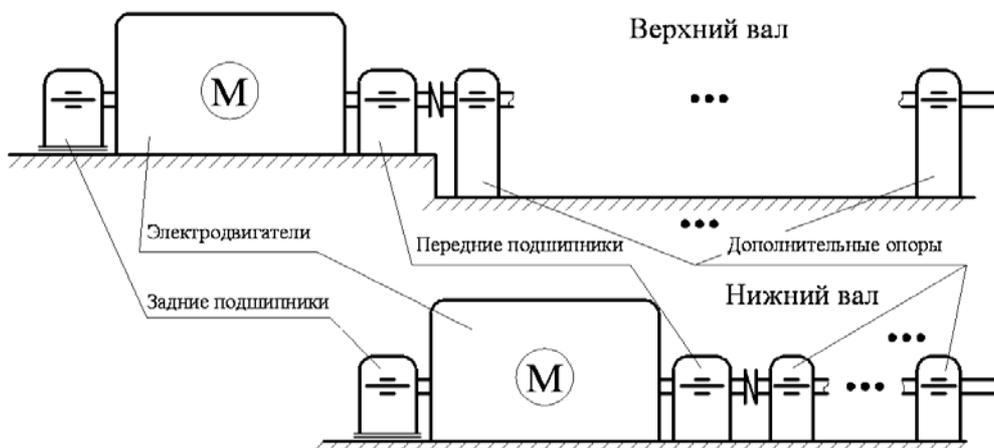


Рисунок 1 – Иллюстрация объектов исследований (один из пяти приводов пары валков)

Как видно из рисунка, только изолированные от земли задние подшипники не имеют параллельных электрических цепей в виде дополнительных опор. Передние подшипники верхнего и нижнего валов электрически закорачиваются дополнительными опорами, элементами редукторов и валками (на рисунке не показаны). Таким образом, при реализации электрорезистивных методов трибодиагностики возможно определить лишь усредненную оценку состояния элементов, соединенных параллельно, а, учитывая количество параллельно соединенных ПЖТ, априорно можно утверждать, что объект исследования является крайне сложным с позиции получения и обработки первичной измерительной информации.

Режим работы – циклический, включающий периодическое снижение скорости от рабочего значения ( $V = 200 \dots 400 \text{ мин}^{-1}$ ) до  $6 \text{ мин}^{-1}$ , а также остановки двигателей.

### ЦЕЛЬ МЕТОДИКИ

*Целью* оценки состояния ПЖТ электрорезистивным, вибрационным и тепловым методами является определение их фактического состояния и принятие решения о возможности их дальнейшего использования в течение следующей межконтрольной наработки, а также определение предаварийного и аварийного режима эксплуатации ПЖТ. Техническое состояние ПЖТ оценивается в динамическом режиме по интегральным (усредненным) параметрам флуктуирующего электрического сопротивления, а также по параметрам радиального и осевого виброперемещения валов ПЖТ. Для повышения надежности диагностирования реализуется непрерывный контроль температуры ПЖТ. При этом основным содержанием трибомониторинга является *комплексная оценка состояния ПЖТ* без распознавания типа дефекта.

### СУЩНОСТЬ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ, КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

*Сущность электрорезистивного метода контроля.* В основу электрорезистивных методов трибомониторинга заложена оценка технического состояния ПЖТ в динамическом режиме по интегральным характеристикам флуктуирующего электрического сопротивления, измеренного между валом и корпусом (вкладышем) ПЖТ.

Физическая сущность метода заключается в следующем. При работе ПЖТ между валом и вкладышем в результате гидродинамического и гидростатического (при наличии гидростатического) эффектов образуется устойчивая пленка смазочного материала, разделяющая поверхности трения и препятствующая их металлическому контактированию. Толщина пленки (масляного клина) непрерывно флуктуирует, возможны ее кратковременные местные

разрушения в контактах наиболее высоких микронеровностей поверхностей (микроконтакты). Смазочный материал обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому изменения толщины смазочной пленки и микроконтактирования приводят к соответствующим флуктуациям электрического сопротивления зоны трения и ПЖТ в целом.

Ухудшение технического состояния ПЖТ, вызванное износом рабочих поверхностей его деталей, появлением на них локальных дефектов, дефектами макрогеометрии деталей, дисбалансом вала и прочими факторами приводит к однозначному ухудшению состояния смазки в зонах трения – к увеличению степени флуктуаций толщины смазочной пленки, частоты и длительности микроконтактирования, что, в свою очередь, вызывает соответствующие изменения электрического сопротивления подшипника.

В качестве основного контролируемого параметра используется нормированное интегральное время (НИВ) микроконтактирования  $\bar{K}$ :

$$\bar{K} = \frac{1}{T_{и}} \sum_{i=1}^{n_T} (t_{ки} - t_{ни}), \quad (1)$$

где  $T_{и}$  – время измерения параметра;

$n_T$  – число импульсов микроконтактирования за время  $T_{и}$ ;

$t_{н(к)i}$  – время начала (конца)  $i$ -го импульса проводимости.

В качестве дополнительного параметра электрической группы используются средняя частота (СЧМ) микроконтактирования  $F$ , определяемая как отношение числа контактов за время измерения СЧМ ко времени измерения параметра, а также средняя длительность микроконтактирования (СДМ), определяемая как отношение НИВ к СЧМ.

Для измерения параметров может применяться прибор ИПЭК-1 [2], ТУ 4276-195-02069036-2005.

**Сущность вибрационного метода контроля.** Дисбаланс вращающихся масс ротора (вала) является одним из наиболее распространенных дефектов рассматриваемого оборудования. Причины возникновения дисбаланса в оборудовании могут иметь различную природу, являться следствием особенностей конструкции и эксплуатации. Все причины появления дисбалансов, проявляющихся в появлении вибрации, можно условно свести в несколько основных групп:

- 1) дефект изготовления вращающегося ротора или его элементов, дефекты, возникающие в результате транспортирования и хранения;
- 2) дефекты сборки;
- 3) наличие на вращающемся роторе изношенных, дефектных, недостающих, недостаточно прочно закрепленных деталей и узлов и т. д.;
- 4) результат воздействия параметров технологических процессов и особенностей эксплуатации данного оборудования, приводящих к неравномерному нагреву и искривлению роторов;
- 5) механические ослабления (люфт);
- 6) общее ослабление фундамента;
- 7) ослабление креплений к фундаменту;
- 8) ослабление посадки элементов на валу.

Кроме рассмотренных причин источником вибраций являются различные дефекты, возникающие при работе ПЖТ:

- 1) проблемы состояния рабочих поверхностей подшипника;
- 2) проблемы величины зазора между галтелью вала и вкладышем;
- 3) проблемы несущей способности смазочного масла (масляного клина).

Предлагаемыми контролируемыми параметрами являются:

- 1) амплитуда  $\Delta 1$  виброперемещения вала в направлении  $45^\circ$  от вертикали;
- 2) амплитуда  $\Delta 2$  виброперемещения вала в направлении минус  $45^\circ$  от вертикали;
- 3) амплитуда  $\Delta 3$  осевого виброперемещения.

Для измерения параметров применяются вихретоковые преобразователи с порогом чувствительности 1 мкм. Вторичным диагностическим параметром является абсолютная амплитуда  $\Delta_r$  радиального виброперемещения, определяемая по проекциям радиальных виброперемещений.

**Сущность теплового контроля.** Тепловое состояние фрикционного контакта обычно на практике является решающим фактором при оценке работоспособности трибообъекта, в частности, ПЖТ.

Анализ структуры отказов изделий машиностроения показывает, что основной причиной выхода их из строя в условиях эксплуатации является не внезапная поломка деталей, а износ и нестабильность триботехнических характеристик. В целом по промышленности доля отказов из-за износа деталей составляет 60 % от общего их числа. Приоритетное влияние на развитие процессов трения и износа имеет температура. С увеличением температуры резко возрастает интенсивность изнашивания, причем, по достижении некоторого предельного значения температуры в узле трения, интенсивность изнашивания многих фрикционных материалов становится катастрофической.

Трение – типичный диссипативный процесс, при котором происходит превращение большей части механической энергии (по имеющимся экспериментальным данным до 90-95 %) в тепло. Температура влияет на характер контакта элементов пары трения (упругий или пластический). Если при трении происходят только упругие деформации, то работа трения переходит полностью в тепловую. Если же условия трения таковы, что происходит необратимый процесс трения – пластическая деформация, то на нее расходуется часть работы трения, но и в этом случае в тепло переходит 75-87 % работы трения. При трении за счет изменения температуры в зоне контактирования меняются физико-механические свойства материалов. Температура может изменить характер взаимодействия поверхностей, во многом влияет на процессы образования пленок окислов, химических соединений, упрочнения и разупрочнения поверхностей трения, износа смазочного материала и т.п.

Обычно считается, что генерирование тепла при трении обусловлено деформированием материала в местах фактического контакта. В связи с этим можно отметить некоторые процессы, молекулярный механизм которых связан с переходом механической энергии в тепловую. Это пластическое деформирование, гистерезис, диспергирование и вязкое течение. Последний процесс наиболее характерен для гидродинамического трения, где он является, по существу, единственным источником тепла.

Другой источник тепла можно связать с процессами возникновения и разрушения адгезионных связей. Эти процессы энергетически не эквивалентны, и разность их энергий обуславливает выделение (или в особых ситуациях поглощение) тепла.

Высокие температуры (по различным оценкам локальные вспышки составляют до 800-1000 °С, тогда как избыточная объемная температура, в том числе в ПЖТ, может практически отсутствовать или быть незначительной), развивающиеся при трении, могут привести к такому нежелательному эффекту, как схватывание с последующим вырывом материала (задиры поверхности).

По предлагаемой методике в рамках теплового контроля определяется температура  $\Theta$  корпусного элемента ПЖТ терморезистивным методом.

### **ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Для реализации функционального диагностирования и принятия решений о видах технического состояния ПЖТ выполняется сбор и анализ информации:  $\bar{K}$ ,  $F$  (СЧМ),  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  и  $\Theta$ , а также СДМ и  $\Delta_r$  (вторичные диагностические параметры, определяемые расчетным путем при реализации программы сбора и обработки).

Основанием для формирования числовых значений уставок электрических диагностических параметров является следующее:

– результаты математического моделирования значения вероятности электрического контактирования в ПЖТ;

– результаты предварительных экспериментальных исследований (имеющиеся результаты диагностики);

– наличие параллельных (шунтирующих) электрических цепей.

Параллельными электрическими цепями являются неизолированные ПЖТ электродвигателей и вторичных валов (несколько ПЖТ на одном валу).

По параметру НИВ должны быть обоснованы два вида уставок в зависимости от объекта диагностирования:

– задние ПЖТ;

– передние (неизолированные) ПЖТ.

Основанием для формирования числовых значений уставок температуры является установленный порядок диагностирования ПЖТ по параметру  $\Theta$ .

Основанием для формирования уставок по параметрам  $\Delta_p$  и  $\Delta_3$  (радиальное и осевое виброперемещение) являются результаты предварительных экспериментальных исследований (имеющиеся результаты диагностики) и анализ корреляции параметров вибрации с электрическими параметрами. При этом принято во внимание содержание государственного стандарта, в соответствии с которым виброперемещение валов двигателя (без дополнительных элементов) может достигать 50 мкм.

Для принятия решения о состоянии диагностируемых объектов используются две уставки параметра НИВ со значениями НИВ1 и НИВ2, соответственно, определяющими переход объекта от состояния «хорошо» к состояниям «удовлетворительно» (превышение уставки НИВ1) и «неудовлетворительно» (превышение уставки НИВ2).

Значения НИВ1 и НИВ2 являются индивидуальными для каждого типа объектов диагностирования.

Значение уставки по параметру  $\Theta$  составляет 50 °С.

Значение уставки по параметру  $\Delta_p$  составляет 300 мкм.

Значение уставки по параметру  $\Delta_3$  (осевое виброперемещение) соответствует пределам диапазона преобразования преобразователей (2 мм).

Процедуры диагностирования определяются частотой  $V$  вращения валов электродвигателей.

ПЖТ работают в условиях комбинированной смазки (различным режимам работы стана соответствуют различные скорости вращения валов). Значения диагностических параметров измеряются для принятия решения о состоянии ПЖТ в режиме, когда скорости вращения валов соответствуют рабочим режимам (более 200 мин<sup>-1</sup>).

Интервалы времени, при которых производится останов стана, используются для самодиагностики канала измерения НИВ: при  $V=0$  значение НИВ теоретически должно равняться единице. Принимая во внимание возможность нарушения контакта токосъемника с валом и, считая допустимым внесение погрешности при измерении НИВ до 10 %, рекомендуется при  $V=0$  проводить сравнение текущих результатов измерения НИВ с уровнем 0,9. Если условие не выполняется, необходимо вывести сообщение о нарушении контакта токосъемника.

Контроль температуры выполняется непрерывно и не зависит от значения частоты  $V$ .

Сбор параметров  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  выполняется непрерывно. Анализ значения параметра  $\Delta_p$  осуществляется в режиме, когда скорости вращения валов соответствуют рабочим режимам (более 200 мин<sup>-1</sup>).

При анализе диагностических параметров должна соблюдаться следующая приоритетность.

Сбор информации должен осуществляться по всем каналам измерения параллельно.

Основными диагностическими параметрами являются НИВ и СДМ. В концепции предлагаемого алгоритма температура и вибрационные параметры носят вспомогательную функцию и предназначены, в основном, для увеличения глубины поиска дефектного ПЖТ и повышения достоверности результатов диагностирования.

Основной цикл алгоритма диагностирования приведен на рисунках 2 и 3.

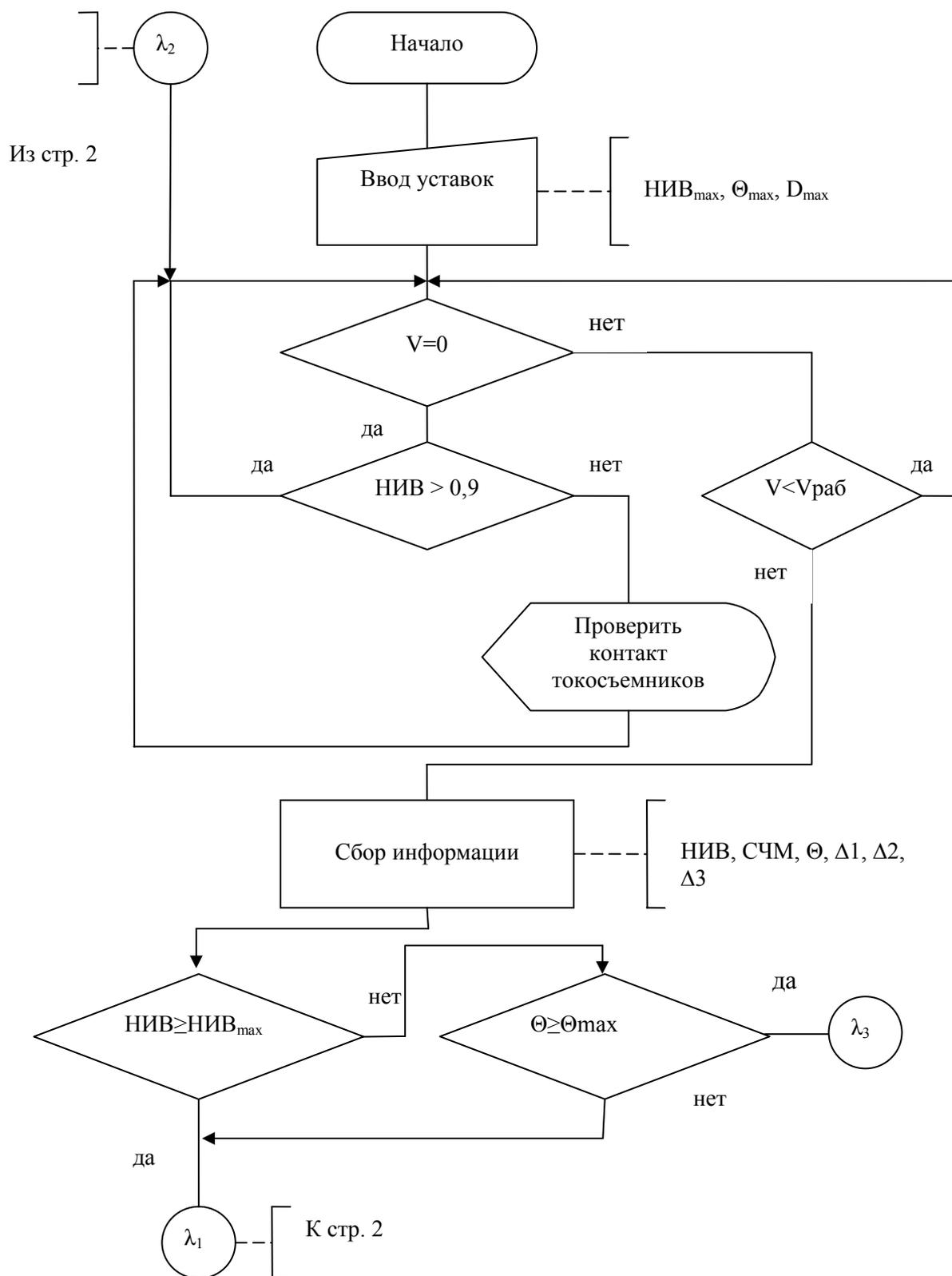


Рисунок 2 – Алгоритм сбора и обработки диагностической информации и принятия решений

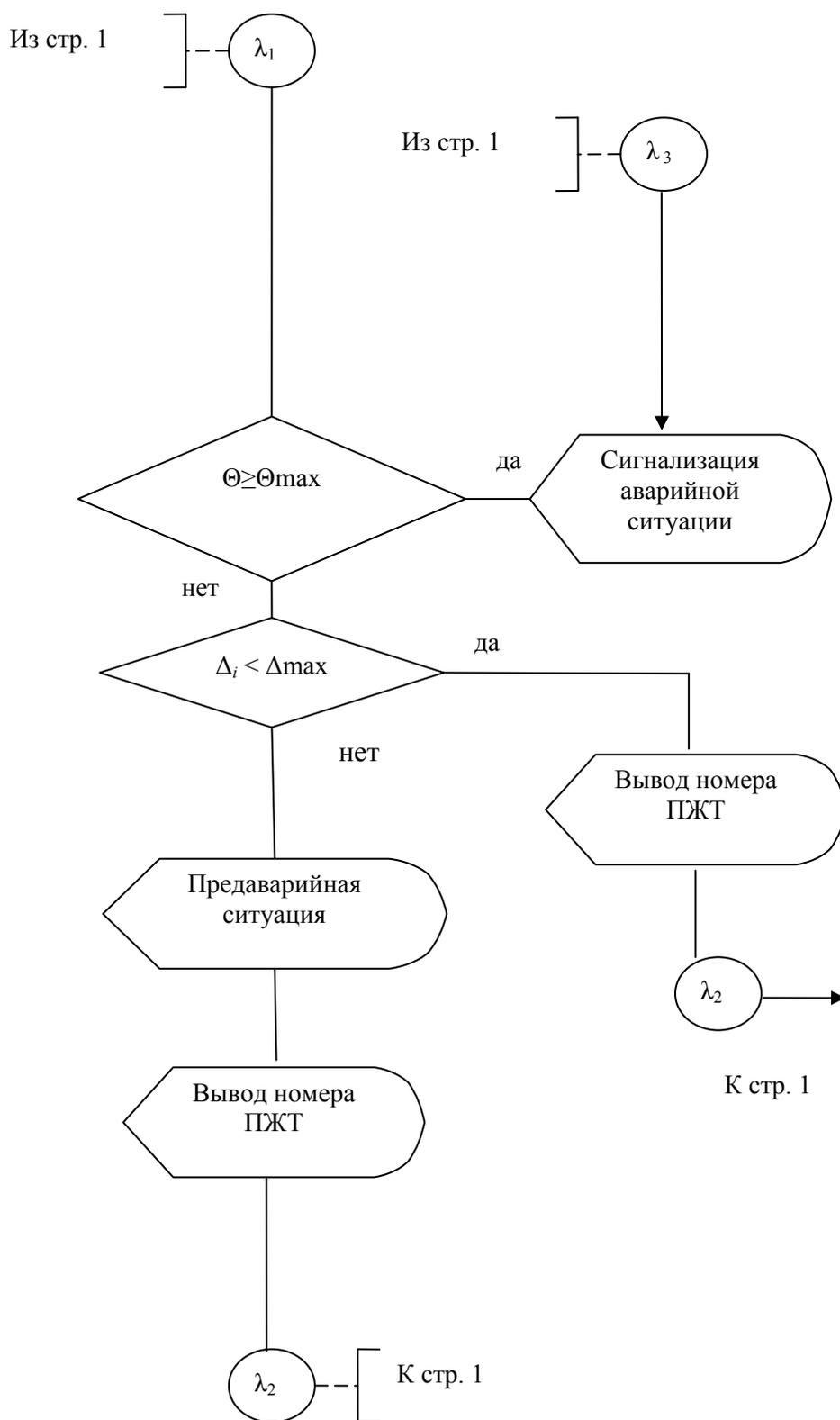


Рисунок 3 – Продолжение алгоритма

При подаче сигналов об аварийной или предаварийной ситуации канал измерения НИВ позволяет однозначно установить место отказа при условии, что отказ происходит в заднем (изолированном) ПЖТ.

В случае выполнения условия  $\text{НИВ} \geq \text{НИВ}2$  для передних опор локализация места отказа осуществляется на основе дополнительной диагностической информации (температура и вибрационные параметры). В качестве прогноза по отказу анализируется ПЖТ, для которого наблюдаются наибольшие значения избыточной температуры и вибрационных параметров.

### **ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТОКОЛУ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Протокол должен содержать следующие данные:

- а) дату оформления протокола результатов диагностирования;
- б) тип объекта диагностирования (номер клетки, номер двигателя, номер ПЖТ);
- в) зафиксированные значения параметров НИВ, СДМ,  $\Theta$ ,  $\Delta_r$  и  $\Delta_3$ .
- г) значения уставок в соответствии с типом объекта диагностирования;
- д) информацию о результатах контроля качества контакта токосъемника с валом;
- е) общее заключение о результатах диагностирования электрорезистивным методом.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

2 Подмастерьев, К.В. Измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин // Контроль. Диагностика. – 2005, № 11. – С. 7-8.

#### **Пахолкин Евгений Васильевич,**

Орловский государственный технический университет, г.Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 419876,

E-mail: [Eugene\\_P@bk.ru](mailto:Eugene_P@bk.ru)

#### **Мишин Владислав Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г.Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 419876,

E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

В.В. ПРОХОРОВ, Б.И. ВОЛКОВ, П.Н. ШКАТОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН ПОД СТЕЛЛИТОВЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПЛАСТИНАМИ В ЛОПАТКАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

*Рассмотрена задача выявления на ранней стадии дефектов в зоне припайки защитных стеллитовых пластин лопаток паровых турбин. Показано, что наиболее вероятно развитие трещин под местом соединения пластин. Проведены теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия накладного вихретокового преобразователя (ВТП) с дефектными лопатками. Установлено, что вихретоковым методом на основе амплитудно-фазового способа обработки возможно надежное выявление дефектов в зоне припайки стеллитовых пластин.*

*The article considers a task of defects identification on early stage for steam turbine blades in zone reinforced by soldering stellite plates. It shows that most likely crack propagation zone is located between stellite plates. The results of theoretical and experimental investigations for interaction between eddy current probes with defect blades are cited. It is proved that eddy current method with gain-phase signal processing providing reliable defects identification in blades' zones affected by heat under stellite plates soldering process.*

О необходимости своевременного надежного и качественного выявления дефектов на ранней стадии их развития говорится много, однако существующие методики позволяют надежно выявлять уже развитые трещины, превышающие по своей протяженности некоторый критический (минимальный) размер.

Представляется интересным и важным разработать методику и средства обнаружения скрытых дефектов типа трещин на ранней стадии их развития.

Практика изучения обнаруженных трещин в лопатках паровых турбин показывает, что трещины, в основном, развиваются в концентраторах механических напряжений в металле. Ярким примером такого концентратора является стык двух стеллитовых противозерозионных пластин, припаянных на внешнюю часть входной кромки пера лопатки.

Для того, чтобы понять механизм возникновения и роста трещины, была создана модель на основе метода конечных элементов в программной среде *ANSYS*, позволяющая определить распределение и значения напряжений по телу лопатки.

При расчете напряжений использована идеализированная модель без учета закрутки пера лопатки вокруг продольной оси. В реальных условиях на лопатку воздействует ряд силовых факторов таких, как центробежные силы и давление струи пара. Для простоты и понимания качественной картины распределения напряжений по телу лопатки прикладываемое усилие принималось постоянным и статическим. Значение силы, приложенной к лопатке, при моделировании было принято равным 500 Н, что схоже с реальными условиями эксплуатации лопатки. За точку приложения силы был принят свободный конец лопатки. Модуль упругости стали был принят равным  $1,91 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup>, а коэффициент Пуассона – 0,28.

Геометрия и размеры лопатки представлены на рисунке 1.

Из результатов математического моделирования следует, что максимальные напряжения сосредоточены в стыках между стеллитовыми пластинами на верхней части входной кромки лопатки со стороны припайки стеллитовых пластин. Максимальное значение напряжений в этом секторе составило 4 380 МПа, хотя максимальные напряжения в основном теле лопатки и на входной кромке вне зоны наплавки пластин не превышают 980 МПа. Анализ эксплуатационного разрушения лопаток согласуется с результатами расчетов и показывает следующие закономерности:

- развитие трещин, в основном, происходит в области стыка двух стеллитовых пластин;

- в широких стыках трещины наблюдаются чаще (при прочих равных условиях);
- приведшие к разрушению лопаток трещины ориентированы перпендикулярно кромке лопатки;
- у лопаток, разрушенных по причине трещинообразования, зафиксирована повышенная хрупкость металла в зоне пайки стеллитовых пластин.

Развитые трещины, обычно, представляют собой сквозные трещины протяженностью более 12...15 мм при ширине раскрытия около 0,15 мм. На рис. 2 приведена фотография участка дефектной лопатки, снятой с 17-ой ступени ротора турбины типа *K-50-90 ЛМЗ* 1952 г. пуска *Южно-Уральской ГРЭС*, марка стали 20Х13, твердость в зоне припайки стеллитовых пластин 200 НВ.

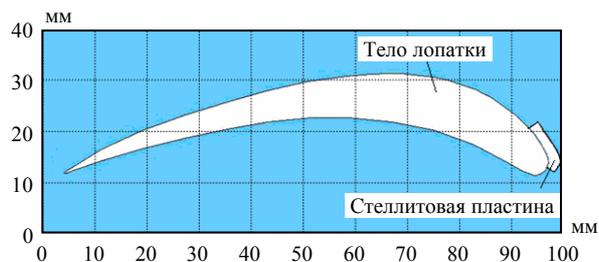


Рисунок 1 – Профиль лопатки с защитными стеллитовыми пластинами

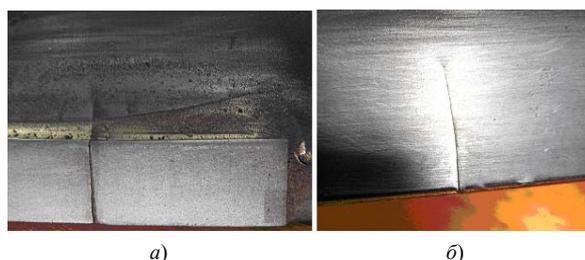


Рисунок 2 – Участок лопатки с трещиной: а – вид со стороны припайки стеллитовых пластин, б – с противоположной стороны лопатки

Условия работы лопатки: давление пара равно 8,8 МПа, температура составляет 500°С, наработка на момент выявления дефекта – 404000 ч. Плоскость трещины в металле дефектной лопатки совпадает с плоскостью стыка стеллитовых пластин. Протяженность трещины с противоположных сторон лопатки практически одинакова. Методика выявления таких развитых трещин известна и успешно применяется на практике [1].

Для исследования возможности выявления трещин в лопатках с наплавленными стеллитовыми пластинами вихретоковым методом неразрушающего контроля на ранней стадии разрушения предложена трехслойная геометрическая модель, соответствующая лопатке с трещиной на разных этапах ее развития. В этой модели имеются три слоя металла:  $M_1$  – основной металл,  $M_2$  – слой припоя,  $M_3$  – защитная пластина. Здесь  $T_1, T_2, T_3$  – толщины соответствующих слоев металла;  $h_1, h_2, h_3$  – глубина трещины в соответствующем слое;  $t_1, t_2, t_3$  – ширина трещины в соответствующем слое. Различаются следующие состояния контролируемого объекта:  $A_0$  – бездефектная лопатка, стеллитовая пластина не имеет стыка между пластинами в зоне контроля;  $A$  – бездефектная лопатка со стыком пластин в зоне контроля;  $C_1$  – несквозная трещина в слое  $M_1$ ;  $C_2$  – сквозная трещина в слое  $M_1$ ;  $D$  – трещина только в слое припоя  $M_2$ ;  $B$  – сквозная трещина в слоях  $M_1, M_2$  и  $M_3$ . На рис. 3 отражен процесс развития трещины, от исходного состояния ( $A$ ) до сквозной трещины ( $B$ ).

В исходном состоянии трещина отсутствует (ситуация  $A_0 - A$ ). Развитие трещины начинается со стороны напайки стеллитовых пластин. С учетом напряженного состояния зон лопатки в стыке пластин можно ожидать два возможных сценария начальной стадии развития трещины в трехслойной системе.

По первому сценарию трещина начинается в металле лопатки ( $C_1$ ) при неразрушенном слое припоя с последующим ростом глубины ( $C_2$ ) до сквозного разрушения всех трех слоев ( $B$ ). По второму сценарию развитие трещины идет по пути ( $A - D - B$ ).

Интересным представляется изучить распределение вихревых токов в рассматриваемой нами трехслойной модели. Для этого в программной среде *ANSYS* была создана расчетная модель взаимодействия контролируемого объекта с накладным ВТП. Расчетная модель, представленная на рис. 4, построена с учетом реальных соотношений размеров основного металла лопатки, толщины припоя и стеллитовых пластин. Поэтому толщина слоя, имитирующего припой, на рисунке показана прослойкой.

Геометрические параметры расчетной модели приведены на рисунке 5.

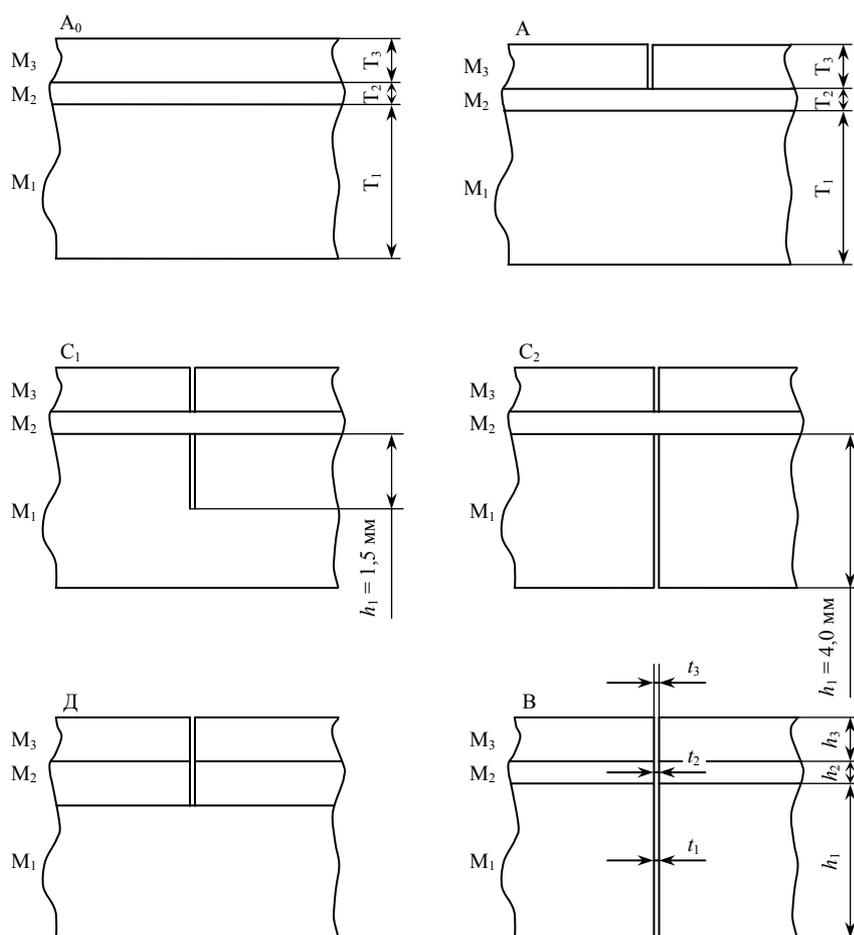


Рисунок 3 – Геометрические модели развития трещины: A<sub>0</sub>, A, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, Д, В

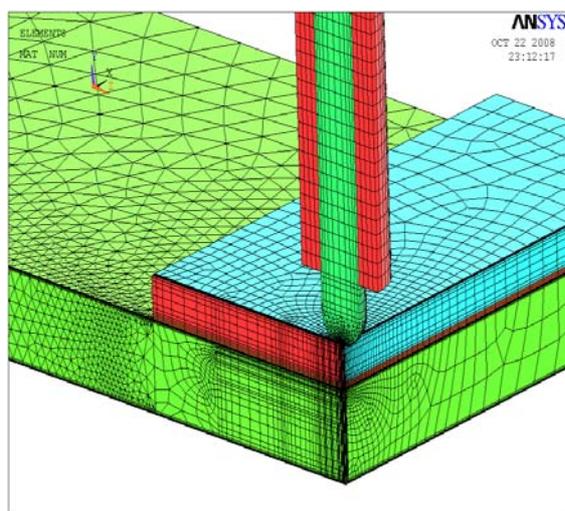


Рисунок 4 – Расчетная модель взаимодействия контролируемого объекта с вихрековым преобразователем

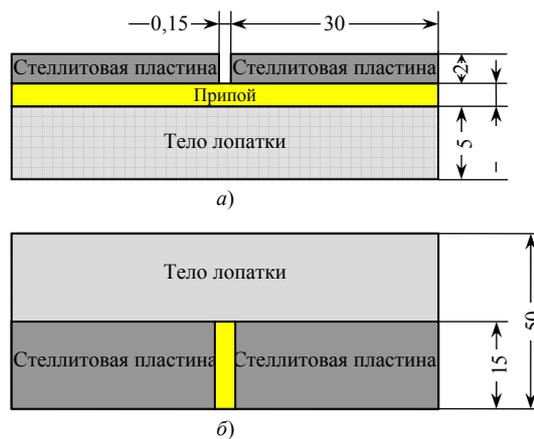


Рисунок 5 – Геометрические параметры модели:  
а – вид спереди; б – вид сверху

При моделировании параметры, характеризующие вихрековые процессы, принимались близкими к реальным: частота тока возбуждения 35,2 кГц, сила тока возбуждения 100 мА. На рисунке 6 представлен годограф, на котором каждому состоянию трехслойной модели соответствует своя область значений.

Как видно из рисунка точки, соответствующие разным состояниям трехслойной модели, пространственно разделены на годографе, что является предпосылкой для выявления дефектов в лопатках (трещин в стыках стеллитовых пластин) на разных стадиях развития.

Для реализации этой модели на практике были изготовлены образцы из перлитной стали, представляющие собой полудиски различной толщины (рисунок 7). Полудиски, установленные на сплошное основание, как известно, позволяют легко и с достаточной точностью моделировать трещину различной глубины и ширины раскрытия [2].

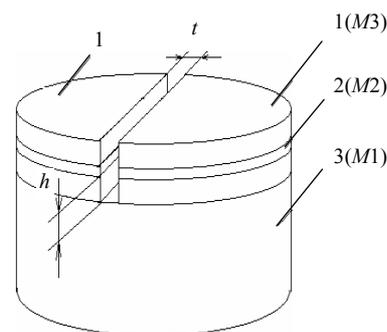
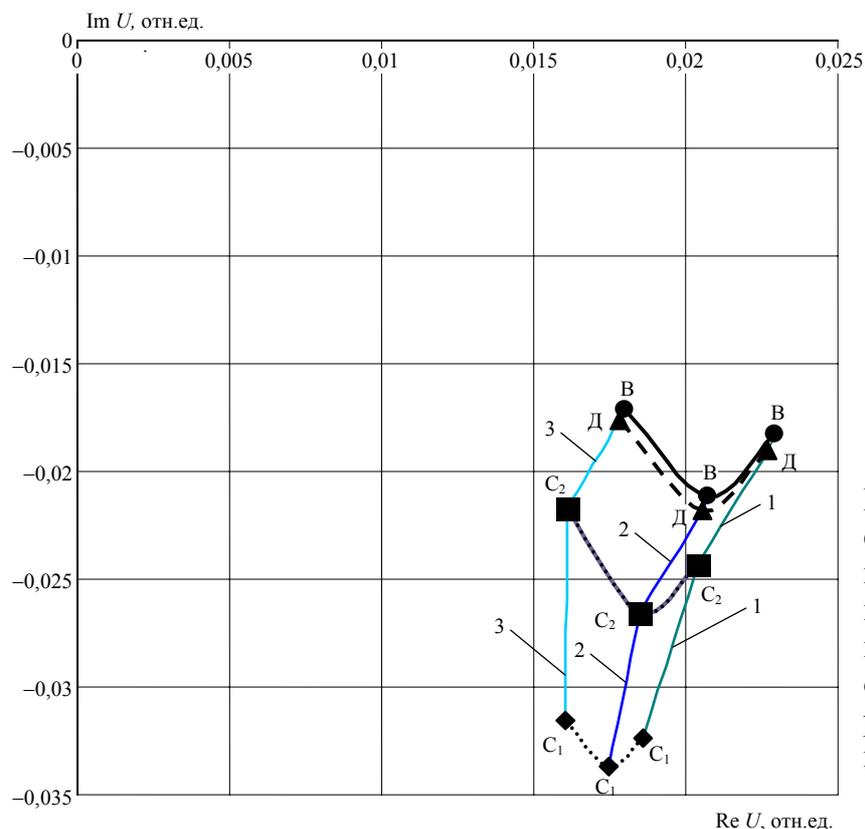


Рисунок 7 – Общий вид составного образца: 1(M3) и 2(M2) – сменные полудиски; 3(M1) – цельное основание образца; t – ширина раскрытия трещины; h – глубина трещины

Рисунок 6 – Годограф относительного вносимого напряжения ВТП для каждого состояния трехслойной модели при разных зазорах, построенный путем моделирования в программе ANSYS: C<sub>1</sub> – трещина глубиной h<sub>1</sub> = 1,5 мм в металле M<sub>1</sub>; C<sub>2</sub> – тоже что и C<sub>1</sub>, при h<sub>1</sub> = 4 мм; Д – трещина только в металле M<sub>2</sub>: 1 – зазор z = 0,1 мм; 2 – z = 0,25 мм; 3 – z = 0,5 мм

Магнитные и электрические свойства материалов M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> и M<sub>3</sub> приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены параметры толщин слоев (T<sub>1-3</sub>), глубин трещин (h<sub>1-3</sub>) и их ширины (t<sub>1-3</sub>) согласно рисунку 3.

Таблица 1 – Магнитные и электрические свойства материалов M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>

Материал	Удельная проводимость $\sigma$ , м/(Ом·м <sup>2</sup> )	Магнитная проницаемость $\mu$ , отн. ед.
M <sub>1</sub>	0,16·10 <sup>7</sup>	7000
M <sub>2</sub>	5,9·10 <sup>7</sup>	1
M <sub>3</sub>	0,11·10 <sup>7</sup>	1

Таблица 2 – Геометрические параметры трещины

T <sub>1</sub> , мм	T <sub>2</sub> , мм	T <sub>3</sub> , мм	h <sub>1</sub> , мм	h <sub>2</sub> , мм	h <sub>3</sub> , мм	t <sub>1</sub> , мм	t <sub>2</sub> , мм	t <sub>3</sub> , мм
4	0,3...0,6	1,3...3,9	0...4	0...0,6	0...2,6	0...0,1	0...0,1	0...0,5

Исследования проводились с использованием компенсационной схемы измерения составляющих вносимого напряжения вихретокового преобразователя при помощи

компьютерной системы “Комвис-12” на специальном стенде. Система позволяет фиксировать параметры сигнала и отображать их на комплексной плоскости в виде годографа.

Преобразователь параметрического типа содержит 200 витков провода марки ПЭЛ-0,09, намотанных на цилиндрический сердечник из феррита марки НМ 2000 диаметром 1,8 мм. Эквивалентный радиус преобразователя рассчитывался согласно работе [3] и был принят равным 2 мм. Рабочая частота 35,2 кГц, ток 100 мА, усиление 54 дБ. Обобщенный вихретоковый параметр рассчитывался по выражению

$$\beta = R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\mu_a \cdot \omega \cdot \sigma},$$

приняли  $\beta = 3,$

где  $R_{\Sigma}$  – эквивалентный радиус ВТП;  $\mu_a, \sigma$  – абсолютная магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость металла, соответственно;  $\omega$  – круговая частота тока возбуждения.

Для ферромагнитных сталей типа 12Х13, 15Х11МФ и 20Х13 величина  $\mu_a$  принималась равной начальной проницаемости, в связи с тем, что ВТП работает в области слабых полей и слабо связан с объектом. Компенсация сигнала производилась в воздухе.

Стенд оснащен системой механического сканирования, которая позволяет с высокой точностью перемещать преобразователь в трех направлениях с заданным углом наклона относительно исследуемого образца. Это позволило имитировать воздействие на выходной сигнал ВТП ряда “мешающих” факторов, присущих процессу реального контроля. Было изучено воздействие колебаний наклона преобразователя  $\Delta\beta$  и расстояния до контролируемой поверхности  $\Delta Z$ .

На рисунке 8 представлены обобщенные результаты экспериментов в виде годографа преобразователя в зависимости от наличия и величины изученных факторов воздействия на ВТП. Из годографа видно, что при изменении параметров  $T, h$  и  $t$  в пределах, указанных в таблице, для каждого состояния образуется некая область точек на комплексной плоскости, соответствующая конкретному сочетанию параметров и виду трещины. Стрелками указано направление действия эффекта от изменения этих параметров. В каждой области для простоты анализа и удобства выработки методики контроля была введена усредненная точка, движение которой по комплексной плоскости можно коррелировать с движением всей области точек, характерных для данной модели трещины.

При сопоставлении двух годографов: теоретического, полученного путем моделирования в программе ANSYS (рисунок 6) и практического, полученного экспериментально с использованием системы “Комвис-12” (рисунок 8) видны различия в положении характерных точек на комплексной плоскости. Однако качественное расположение точек в “теоретическом” и “практическом” годографах схоже. Как видно из рисунка 8, точки, соответствующие каждому состоянию (А<sub>0</sub> – В), занимают на плоскости годографа достаточно обособленные относительно друг друга зоны (аналогичная ситуация прослеживалась и на теоретическом годографе, полученном путем моделирования на рисунке 6). Последнее обстоятельство является предпосылкой возможности выделения области, соответствующей трещинам на ранней стадии их развития, путем отстройки. Действительно, при переносе начала координат в точку  $K_1$  и использовании в качестве информативного параметра фазы сигнала  $\Phi$  можно отличить области С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub>, Д от областей А и В, т.е. выявить трещины в лопатке на ранней стадии их развития. Используя в качестве начала координат точку  $K_2$ , области В, С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> и Д можно выявить амплитудным методом [2]. Опробование этих режимов осуществлялось на реальной лопатке (см. рисунок 2).

По результатам моделирования механизмов развития трещин и формирования вихретокового поля в стыках стеллитовых пластин, построения и сопоставления теоретического и экспериментального годографов можно сделать вывод о возможности выявления трещин на ранней стадии их развития, используя амплитудно-фазовый метод.

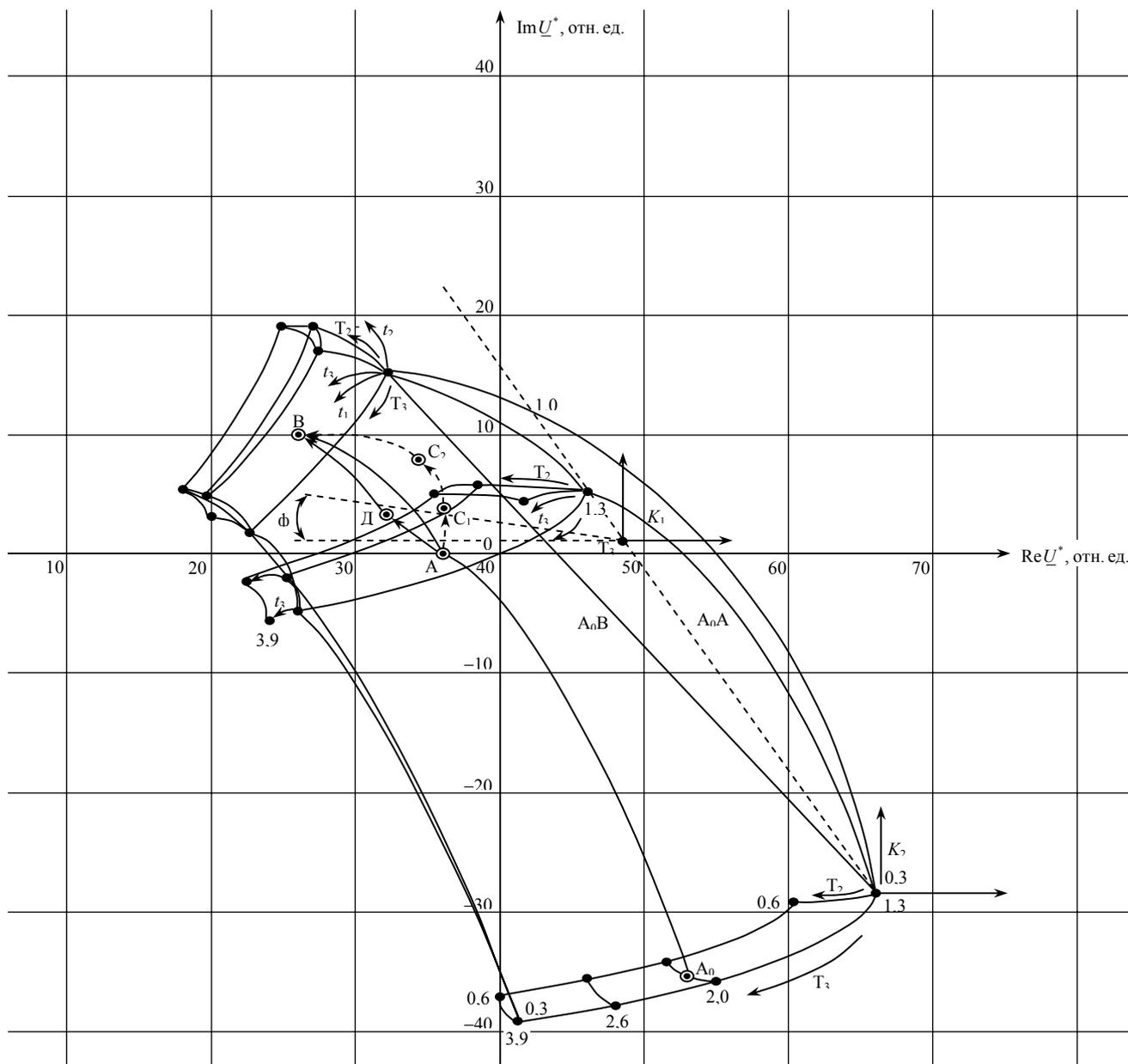


Рисунок 8 – Годограф относительного вносимого напряжения ВТП в зависимости от глубины (индексы  $h$ ), ширины раскрытия ( $t$ ) трещины и толщины слоев ( $T$ ) и свойств металла ( $M$ ) модели участка лопатки со стеллитовыми пластинами

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 РД 153-34.1-17.466-2002. Методические указания по выявлению структурной неоднородности в металле лопаток последних ступеней ЧНД паровых турбин из стали ЭИ961-Ш в зоне припайки стеллитовых пластин.
- 2 Волков Б.И., Прохоров В.В. Оценка точности измерения глубины поверхностных трещин вихретоковым накладным преобразователем при наличии мешающих факторов // Повышение надежности и эффективности работы тепломеханического оборудования ТЭС. Челябинск, 2005.
- 3 Волков Б.И., Агафонов В.А. Исследования параметров локальности вихретокового преобразователя с конусным сердечником // Дефектоскопия, 1983. – № 3.

#### Прохоров В.В.

аспирант кафедры «» МГУПИ,  
Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва

#### Волков Б.И.

к.т.н., доцент кафедры «», МГУПИ  
Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва

#### Шкатов Пётр Николаевич

д.т.н., профессор, декан факультета интеллектуальных систем МГУПИ,  
Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва  
Телефон 8-499-268-76-94. E-mail: [petr\\_shkatov@mail.ru](mailto:petr_shkatov@mail.ru)

*Адрес редакции:*  
Орловский государственный технический университет  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24, 41-98-21  
www.ostu.ru  
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева  
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Сдано в набор 10.11.2008 г.  
Подписано в печать 09.02.2009 г.  
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 7,9.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.