

**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., секретарь  
**Астафичев П.А.** д-р юрид. наук, проф.  
**Иванова Т.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Новиков А.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.

**Редакция**

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

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

**Члены редколлегии**

**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.  
**Зубчанинов 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  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Корндорф С.Ф.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. 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 редакции**

302020, г. Орел, Нагорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

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

© Госуниверситет – УНПК, 2011

## Содержание

### Естественные науки

<i>Корнеев А.Ю.</i> Сравнительный анализ статических характеристик конических гидростатических подшипников с точечными и прямоугольными камерами.....	3
<i>Корогодина И.В., Тарасова М.А.</i> Реализация содержательных междисциплинарных связей физики и математики в условиях технического вуза.....	10
<i>Хорошилова М.В.</i> Электронное и фононное возбуждение тонких пленок золота атомарным водородом и сопутствующие эффекты.....	17
<i>Манжосов В.К., Новикова И.А.</i> Преобразование продольной волны деформации линейной формы на границе сопряжения стержней с упругой прокладкой.....	23

### Моделирование технологических процессов

<i>Кухарь В.Д., Селедкин С.Е., Киреева А.Е.</i> Математическое моделирование осадки тонколистových заготовок.....	32
<i>Дерли А.Н., Канатников Н.В.</i> Математическая модель схемы формообразования профиля зуба прямозубого конического колеса зубострогальными резцами.....	37
<i>Маликов А.А., Астахов С.А.</i> Аналитическое определение условий виброустойчивости при точении тонкостенных цилиндрических заготовок многорезцовыми головками.....	42
<i>Андреев Ю.С., Валетов В.А.</i> Анализ параметрических методов описания шероховатости поверхностей.....	49

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Щипанов М.В., Кузовкин А.В.</i> Проектирование магистралей высокого давления для технологической оснастки и электрохимического оборудования.....	58
<i>Мулюкин О.П., Григорьева О.Ю., Дудин М.П., Борзенков М.И.</i> Оценка влияния деструктивных факторов на показатели эксплуатационной надежности клапанно-седельных пар пневмогидроарматуры.....	65

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Катунин А.В., Найденышев А.А.</i> Исследование напряженного состояния режущей части инструмента при врезании в заготовку.....	72
<i>Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Яцун Е.И.</i> Эффективная работа инструмента из композита в условиях прерывистого резания.....	79

### Инновации и кадры в машиностроении

<i>Барсуков Г.В., Родионова Е.М., Степанова Е.Ю.</i> Генерирование новых технических идей, как элемент инновационно-исследовательской деятельности научно-педагогических работников в вузе.....	85
<i>Морозова А.В.</i> Теоретико-методологические основы разработки метода квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства... ..	92

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Лунин М.В., Яковенко М.В., Жидков А.В., Теленев А.М.</i> Анализатор для определения концентрации компонентов биологических жидкостей в диагностике раннего рака.....	99
<i>Ломакин В.В., Трухачев С.С., Трухачева М.И.</i> Биотехническая система формирования эффективного управленческого решения на примере прогнозирования церебральной ишемии у плода и новорожденного.....	107
<i>Новиков А.А.</i> Разработка и формирование структуры математической модели информационно-управляющих систем агрегатов бесперебойного электропитания автономных объектов.....	112
<i>Горленко С.В.</i> Модальный синтез автопилота высоты с частичным исполнением в виде драйвера WINDOWS NT.....	119

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Корндорф С.Ф., Никулина И.Н.</i> Особенности разработки метода испытания экзокарпиев ягод на растяжение.....	129
<i>Пахолкин Е.В., Анцифорова Е.В.</i> Оценка достоверности результатов исследования смазочной способности материалов электрическими методами.....	134
<i>Пузырев С.Г., Сычев С.Н., Чиркин Е.В.</i> Оценка статистической достоверности времен удерживания компонентов моторных масел, полученных методом жидкостной хроматографии при хоршем и плохом разрешении.....	138
<i>Куценко С.А., Винокуров А.Ю.</i> Метод контроля эффективности коагулянтов при очистке сточных вод в промышленных условиях.....	144



The journal is published since 1995  
The journal is published 6 times a year

**№ 6 (290) 2011**  
November - December

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution  
«State University – Education-Scientific-Production Complex»  
(State University – ESPC)

## Editorial council

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidate Sc.  
Tech., Assistant Prof., secretary  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.  
**Ivanova T.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Popova L.V.** Doc. Sc. Ec., Prof.  
**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editorial Committee

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

## Member of editorial board

**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.  
**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., 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,  
Naugorskoe Chosse, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

© State University – ESPC, 2011

## Contents

### Natural science

<i>Korneyev A.Yu.</i> The comparative analysis of the static characteristics of the conical externally pressurized bearings with point and rectangular recesses.....	3
<i>Korogodina I.V., Tarasova M.A.</i> Realization of substantial interdisciplinary communications of physics and mathematics in technical college.....	10
<i>Khoroshilova M.V.</i> Electronic and fononic excitation of thin films of gold by atomic hydrogen and attendant effects.....	17
<i>Manzhosov V.K., Novikova I.A.</i> Transformation of longitudinal wave deformation linear form at the border of rod trimming with resilient pad.....	23

### Process modeling

<i>Kuhar V.D., Seledkin S.E., Kireeva A.E.</i> Mathematical modeling of light workpiece precipitation...	32
<i>Derli A.N., Kanatnikov N.V.</i> Mathematical model of scheme formation a profile of a conic wheel by gear shaping cutters.....	37
<i>Malikov A.A., Astakhov S.A.</i> Analytical definition of conditions chatter stabilities at точении the thin-walled cylindrical preforms block-type heads.....	42
<i>Andreev U.S., Valetov V.V.</i> The analysis of parametric methods of surfaces roughness description.....	49

### Construction, calculation, material

<i>Shchipanov M.V., Kuzovkin A.V.</i> Design of high pressure main lines for technological and electrochemical equipment.....	58
<i>Muljukin O.P., Grigorieva O.Ju., Dudin M.P., Borzenkov M.I.</i> Estimation of influence of destructive factors on indicators of operational reliability klapanno-sedelnyh steam pneumohydraulic apparatus.....	65

### Machine building technology and toolware

<i>Katunin A.V., Naydenyshev A.A.</i> Investigation of stress state cutting part of the tool at cutting in the workpiece.....	72
<i>Kudryashov E.A., Altukhov A.JU., Yatsun E.I.</i> Effective work of the tool from the composite in conditions of faltering cutting.....	79

### Innovation and frame in machine building

<i>Barsukov G.V., Rodionova E.M., Stepanova E.J.</i> Generation of new technical ideas, as an element innovative research activity researchers and teachers in high school.....	85
<i>Morozova A.V.</i> Theoretical and methodological foundations of a method for estimating the specialists qualimetry for the engineering production development.....	92

### Instrument making and biotechnological system

<i>Lunin M.V., Yakovenko M.V., Zhidkov A.V., Telepnev A.M.</i> The analyzer for definition of concentration of components of biological liquids in diagnostics of the early cancer.....	99
<i>Lomakin V.V., Trukhachev S.S., Trukhacheva M.I.</i> Biotechnical system for the effective decision making on the example of fetus and newborn cerebral ischemia forecasting.....	107
<i>Novikov A.A.</i> Working out and formation of structure of mathematical model of information-operating systems of units of uninterrupted power supplies of independent objects.....	112
<i>Gorlenko S.V.</i> The modal synthesis of height autopilot partly realized into windows nt driver.....	119

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Korndorf S.F., Nikulina I.N.</i> Features of the development of a test method skins of berries on the tensile.....	129
<i>Pakholkin E.V., Antsiforova E.V.</i> Estimation of reliability of results of research of lubricant ability of materials by electric methods.....	134
<i>Puzyrev S.G., Sychev S.N., Chirikin E.V.</i> Estimation of statistical reliability of times of keeping components of the engine oils received by method of the liquid chromatography at the good and bad permission.....	138
<i>Kutsenko S.A., Vinokurov A.Yu.</i> The method of control of coagulants efficiency in industry wastewater treatment.....	144

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

УДК 621.822

А.Ю. КОРНЕЕВ

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОНИЧЕСКИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ  
С ТОЧЕЧНЫМИ И ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ**

*Предложены расчетные соотношения для определения статических характеристик конических гидростатических опор в условиях переменных теплофизических свойств смазочного материала. Выражения позволяют получать статические характеристики (несущую способность, расход смазочного материала, потери мощности на трение и прокачку) конических гидростатических подшипников с точечными и прямоугольными камерами. Результаты иллюстрируются характерными графиками, полученными для конических гидростатических подшипников, смазываемых водой, жидким водородом и турбинными маслами.*

**Ключевые слова:** конический гидростатический подшипник с точечными камерами, конический гидростатический подшипник с прямоугольными камерами, статические характеристики, смазочный материал.

Существуют два способа обеспечения смазки со сплошной масляной пленкой, при помощи которых можно получить малое сопротивление трению и продолжительный срок службы подшипников скольжения. Наиболее известный из этих способов носит название «гидродинамической» смазки. В подшипниках с использованием гидродинамического способа смазки давление жидкости создается относительным взаимным вращением подшипника и вала. Таким образом, несущая способность таких подшипников скольжения зависит от относительной скорости вращения вала. Если эта скорость мала, или нагрузка очень велика, то использование гидродинамической смазки может оказаться невозможным [1]. В этом случае для обеспечения режима жидкостного трения без контакта между поверхностями подшипника и ротора необходимо использовать так называемую «гидростатическую» смазку с принудительной подачей смазочного материала. Хотя гидростатические подшипники (ГСП) сравнительно дороги, они обладают определенными эксплуатационными преимуществами по сравнению с другими типами подшипников, а именно:

- высокая несущая способность при любых скоростях (в том числе и при нулевой);
- отсутствие сухого или граничного трения при запуске и малые потери на трение при работе подшипника в широком диапазоне скоростей вращения;
- долговечность гидростатического подшипника зависит только от долговечности системы смазки, так как отсутствует контакт между контактирующими поверхностями подшипника и ротора при любой рабочей скорости и при любой нагрузке;
- возможность заранее проанализировать и рассчитать нагрузочные характеристики, потери мощности на трение и прокачку, температурный режим и жесткость конструкции подшипника.

Опыт показывает, что гидростатический подшипник, изготовленный для какой-либо конкретной турбомашин, в большинстве случаев не может быть использован в другой турбомашине. Вместе с тем и проектирование гидростатического подшипника нельзя представить как механическую операцию с подстановкой имеющихся данных в какие-то готовые формулы, поэтому для каждого конкретного случая необходимо производить расчеты. Гидростатические подшипники могут быть применены практически в любой конструкции, например, их успешно применяют в мощных прокатных станах, металлорежущих станках, оптических и радиотелескопах, больших радарных антеннах и в другом современном оборудовании, работающем при больших нагрузках и малых скоростях. Однако, как отмечается вы-

ше, по сравнению с гидродинамическими опорами, они относительно дороже, так как их применение требует дополнительного источника смазки под давлением, а, соответственно, и более сложных систем, поскольку в них кроме самого подшипника входят такие элементы, как насос и дроссели. Кроме того, смазочный материал необходимо собрать и вернуть к источнику смазки. Для подачи чистой смазки надлежащей вязкости необходимо предусмотреть ее высококачественную фильтрацию и, если требуется, охлаждение или подогрев. Для предотвращения выхода подшипника из строя в случае неисправности в системе подачи смазочного материала, как правило, предусматривается параллельная система подачи смазки [1].

Несмотря на некоторые недостатки, гидростатические подшипники применяются достаточно широко, и по этой причине и были проведены исследования статических характеристик конических гидростатических подшипников скольжения, смазываемых водой, жидким водородом и турбинными маслами. Работоспособность опорного узла обеспечивается за счет давления подачи смазочного материала в питающие камеры, которые могут иметь различную форму: точечные, прямоугольные, круглые, шевронные и т.д. В данной статье исследуются гидростатические подшипники двух типов: ГСП с точечными камерами (см. рис. 1, а) и ГСП с прямоугольными камерами (см. рис. 1, б) [2 – 4].

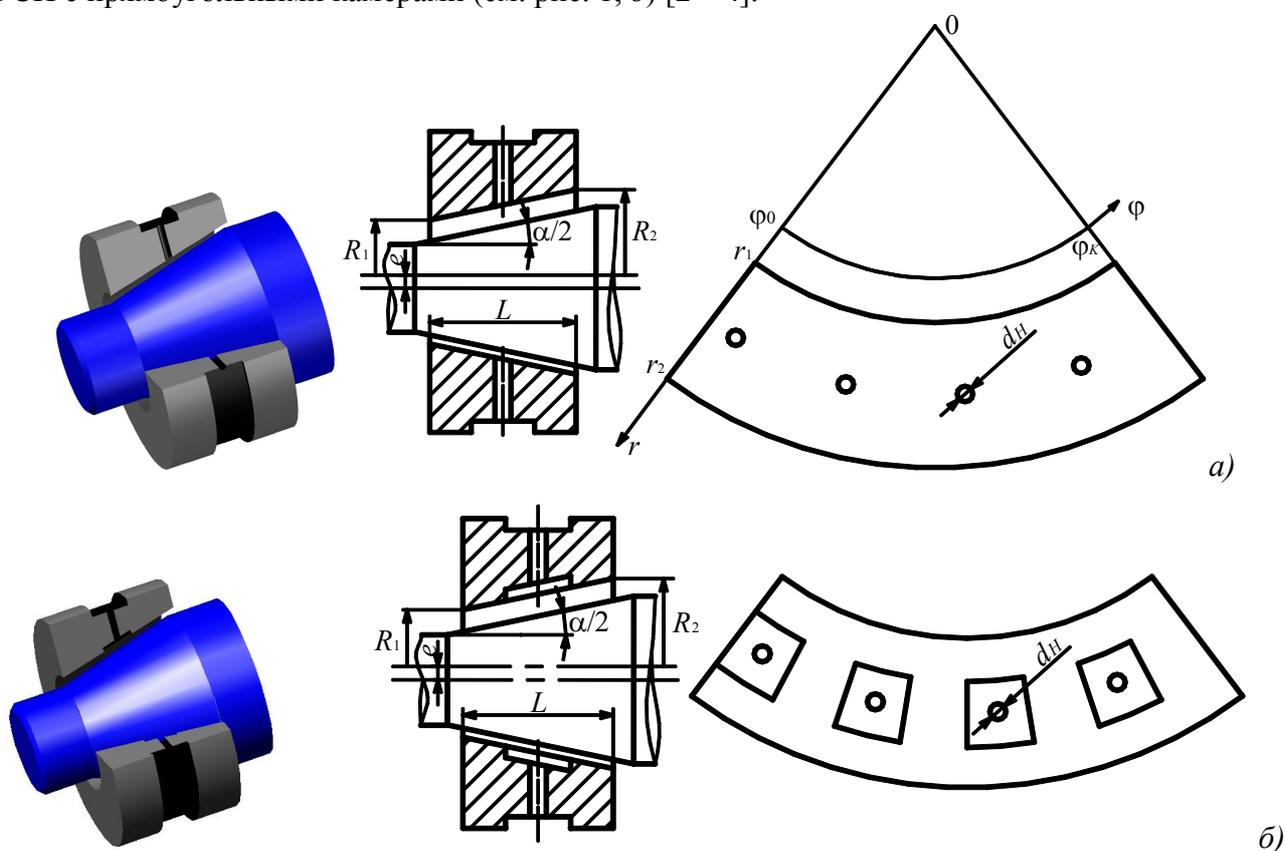


Рисунок 1 – Конические подшипники скольжения  
 а) ГСП с точечными камерами; б) ГСП с прямоугольными камерами

Математическая модель расчета разработана для течения вязкой сжимаемой среды в условиях переменных теплофизических свойств смазочного материала. При использовании воды и жидкого водорода в качестве смазочного материала в зазоре подшипника возможно появление паровой фазы вследствие вскипания и/или кавитации. В этом случае существенно меняются теплофизические параметры смазочного материала в целом (плотность, вязкость и т.д.), что оказывает непосредственное влияние на статические (несущая способность, расход, потери мощности) и динамические (жесткость и демпфирование) характеристики опор. Рассмотрение двухфазного парожидкостного состояния смазочного материала проводится на основании гомогенной модели двухфазной среды [2, 3]. Поскольку в реальных турбомашинах в большинстве случаев в качестве смазочного материала используются различные масла,

для сравнения был также проведен вычислительный эксперимент с целью расчета статических характеристик конических ГСП, смазываемых турбинными маслами марок ТП-22 и ТП-30, свойства которых были аппроксимированы [5]. Зависимости теплофизических свойств однофазных турбинных масел (вязкость, плотность, теплоемкость и др.) в виде функций температуры представлены в таблице 1, зависимости свойств воды и жидкого водорода известны и подробно представлены в работе [2].

Таблица 1 – Аналитические зависимости теплофизических свойств турбинных масел ( $T = 283 - 373$  °К)

№	Параметр	Размерность	Условное обозначение	ТП-22	ТП-30
1	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	$1109,38 + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,794 \cdot T$	$1128,802 + 0,000371 \cdot T^2 - 0,891 \cdot T$
2	Вязкость	Па·с	$\mu$	$0,0017 + 42196,411 \cdot e^{-0,045 \cdot T}$	$0,003 + 424365,19 \cdot e^{-0,05 \cdot T}$
3	Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°С)	$C_p$	$263,93 + \frac{5852,78 \cdot T}{793,05 + T}$	$9125,689 - 8459,562 \cdot e^{-0,0005 \cdot T}$
4	Энтальпия	Дж/кг	$I$	$-227781,56 + 3,403 \cdot T^2$	$-232967,49 + 3,347 \cdot T^2$

Используя представленные аналитические зависимости теплофизических свойств смазочных материалов в математической модели расчета опор скольжения, с учетом уравнений Рейнольдса, баланса энергий, баланса расходов, функции зазора и дополнительных соотношений, замыкающих систему, можно определить функцию поля давлений и, как следствие, рассчитать несущую способность (грузоподъемность), потери мощности на трение и прокачку смазочного материала и его массовый расход, являющимися важнейшими характеристиками подшипника [2, 4], по следующим формулам:

1) несущая способность:

$$W = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2}, \quad (1)$$

где проекции гидродинамических сил, действующих на цапфу, на соответствующие оси координат равны:

$$R_X = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \sin \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad R_Y = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \cos \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad R_Z = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} p \sin(\alpha/2) r d\varphi dr; \quad (2)$$

2) массовый  $Q_m$  и объемный  $Q_v$  расходы:

$$Q_m = \frac{\pi d_H^4}{128 l_H} \sum_{n=1}^{N_P N_K} \left( \frac{(p_0 - p_H)(\rho_H + \rho_0)}{K_H(\mu_H + \mu_0)} \right)_n; \quad Q_v = \frac{Q_m}{\rho_0}, \quad (3)$$

3) потери мощности на трение:

$$N_{mp} = M_{mp} \omega_0, \quad \text{где } M_{mp} = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_K} R^* \tau r d\varphi dr, \quad R^* = r \sin(\alpha/2); \quad \tau = \left[ \frac{h}{2} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} + \frac{\mu K_\varphi V_\varphi}{h} \right]; \quad (4)$$

4) потери мощности на прокачку смазочного материала:

$$N_{np} = Q_v p_0. \quad (5)$$

В приведенных выше соотношениях (1) – (5) приняты следующие обозначения:  $p$  – давление;  $R^*$  – текущий радиус подшипника;  $\alpha$  – угол конусности;  $\beta$  – угловая координата в окружном направлении;  $r, \varphi, y$  – осевая, окружная и радиальная координаты по опорной поверхности подшипника;  $K_H, K_\varphi$  – коэффициенты турбулентности;  $V_\varphi$  – скорость точки на поверхности цапфы;  $h$  – функция полного зазора;  $\omega_0$  – угловая скорость ротора;  $M_{mp}$  – момент сопротивления вращению цапфы;  $\tau$  – касательные напряжения; индексы: 0 – вход в подшипник;  $H$  – жиклер. Полученные выражения (1) – (5) должны быть представлены в разностном виде, подробное изложение алгоритма расчета численным методом приведено в работе [2]. Предложенные расчетные соотношения реализованы в разработанном программном обеспечении «Подшипник–Криоген» [6], которое позволяет рассчитать необходимые статические характеристики конических ГСП с точечными и прямоугольными камерами и сравнить результаты в процентном соотношении.

Для сравнения соответствующих статических характеристик конических ГСП, смазываемых водой, водородом и турбинными маслами, был проведен вычислительный эксперимент, результаты которого представлены ниже на графиках (см. рис. 2 – 5). Подшипники имеют следующие рабочие и геометрические параметры: длина подшипника  $L = 53$  мм; радиус  $R_2 = 24$  мм; угол конусности  $\alpha = 30^\circ$ ; средний радиальный зазор  $h_0 = 50$  мкм; давление подачи  $p_0 = 0,2$  МПа (для воды и турбинных масел) и  $p_0 = 0,5$  МПа (для жидкого водорода); температура смазочной жидкости  $T_0 = 293$  К (для воды и масел) и  $T_0 = 20$  К (для водорода); для ГСП с прямоугольными камерами – число питающих прямоугольных камер  $N_K = 4$ , число рядов камер  $N_P = 1$ , длина камеры по образующей  $L_K = 41$  мм, ширина камеры  $B_K = 8$  мм, число жиклеров, питающих одну камеру  $N_H = 1$ ; для ГСП обоих типов – длина и диаметр жиклера:  $l_H = 4$  мм и  $d_H = 1$  мм.

Анализируя приведенные графики можно отметить, что среди двух представленных типов гидростатических опор скольжения ГСП с прямоугольными камерами (на графиках соответствует непрерывной линии) обладает значительно меньшей несущей способностью по сравнению с ГСП с точечными камерами (соответствует штриховой линии), что связано с достаточно большим объемом камер и, соответственно, уменьшением давлений в них. В процентном соотношении несущая способность ГСП с точечными камерами больше соответствующей характеристики ГСП с прямоугольными камерами, смазываемых водой, в среднем на 57%, 66% и 100% при относительном радиальном эксцентриситете  $e = 0,2; 0,4$  и  $0,6$  соответственно (см. рис. 2, *a*); при смазывании жидким водородом несущая способность подшипников с точечными камерами по сравнению с опорами с прямоугольными камерами больше в среднем в 2 – 2,2 раза для всех рассматриваемых эксцентриситетов (см. рис. 2, *b*). Несущая способность ГСП с точечными камерами, смазываемых турбинными маслами, также значительно больше, чем у ГСП с прямоугольными камерами: в 2,8 раза при небольших ( $e = 0,2$ ) эксцентриситетах и в среднем в 2,2 раза при средних ( $e = 0,4$ ) и больших ( $e = 0,6$ ) эксцентриситетах независимо от марки масла (см. рис. 2, *в, г*). С увеличением угловой скорости независимо от типа смазочного материала происходит рост несущей способности гидростатических опор, особенно значительный при больших эксцентриситетах (см. рис. 2, *a – г*).

Расход смазочного материала, также как и потери мощности на прокачку, через конические ГСП, смазываемые водой, с ростом угловой скорости постоянен или немного снижается, что связано с увеличением давления в зазоре и, как следствие, возрастанием противодействия поступающей смазке (так называемый «запирающий эффект»), увеличение эксцентриситета также приводит к снижению расхода.

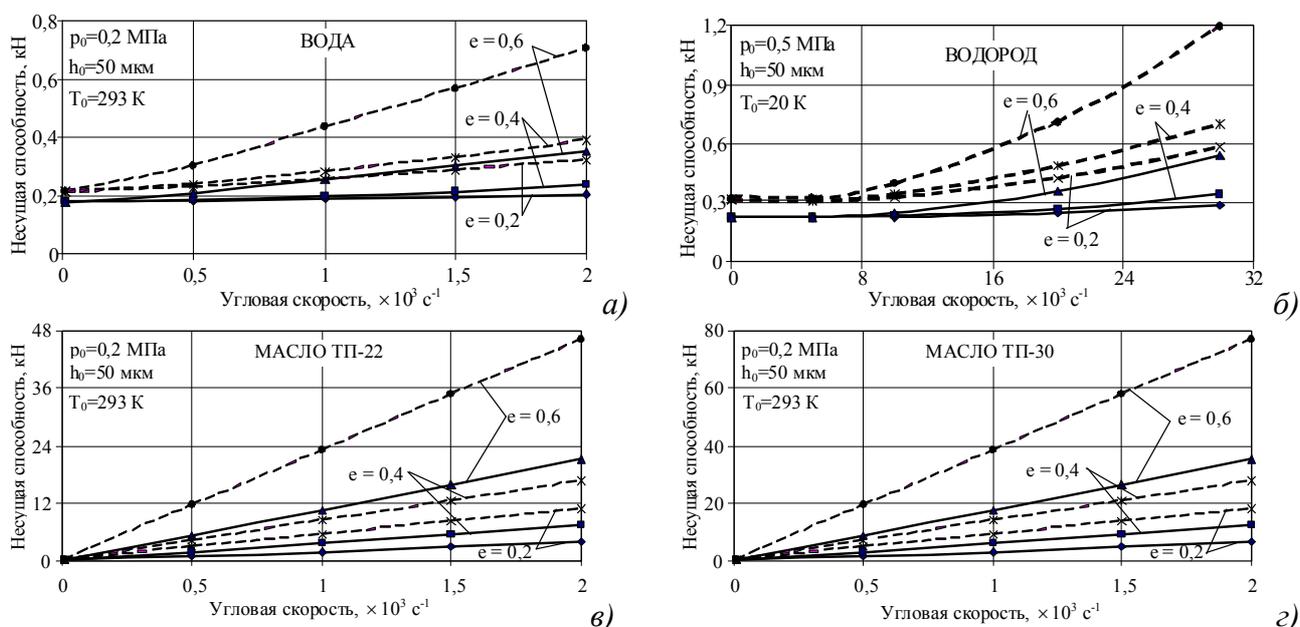


Рисунок 2 – Несущая способность конических ГСП: с прямоугольными камерами (—), с точечными камерами (---)

Если же сравнивать ГСП с прямоугольными камерами и ГСП с точечными камерами, то по расходу наблюдается следующие закономерности: при смазывании водой расход через ГСП с точечными камерами меньше расхода через ГСП с прямоугольными камерами на 61%, 69% и 73% при  $e = 0,2$ ;  $0,4$  и  $0,6$  соответственно (см. рис. 3 и 5, а). При смазывании водородом эксцентриситет не играет существенной роли: расход через ГСП с точечными камерами по отношению к ГСП с прямоугольными камерами снижается в среднем на 67...69% при всех эксцентриситетах (см. рис. 3 и 5, б). Это легко объясняется тем, что геометрические размеры точечных камер значительно меньше размеров прямоугольных камер, соответственно, снижается и проходной размер, что автоматически влечет и снижение расхода. При смазывании турбинными маслами наблюдается аналогичная картина: с ростом угловой скорости и относительного эксцентриситета происходит снижение массового расхода и потерь мощности на прокачку (см. рис. 3 и 5, в, г). При сравнении ГСП с прямоугольными камерами и ГСП с точечными камерами можно отметить снижение расхода для последних на 71...78 % для всех эксцентриситетов и масел.

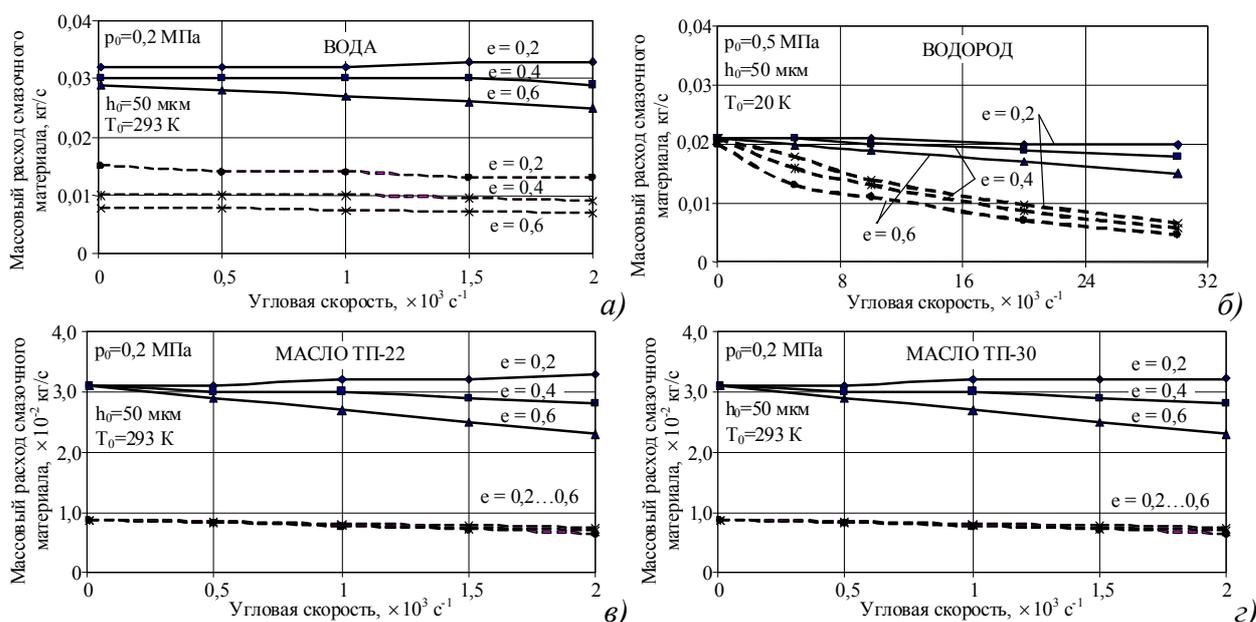


Рисунок 3 – Расход смазочного материала конических ГСП

Потери мощности на трение в исследуемых подшипниках возрастают с увеличением угловой скорости и относительного радиального эксцентриситета. В зависимости от типа подшипника потери мощности на трение более значительны для ГСП с точечными камерами, чем для ГСП с прямоугольными камерами, но в процентном соотношении расхождение незначительное: не более 5 % при всех эксцентриситетах для всех рассматриваемых типов смазочного материала (см. рис. 4).

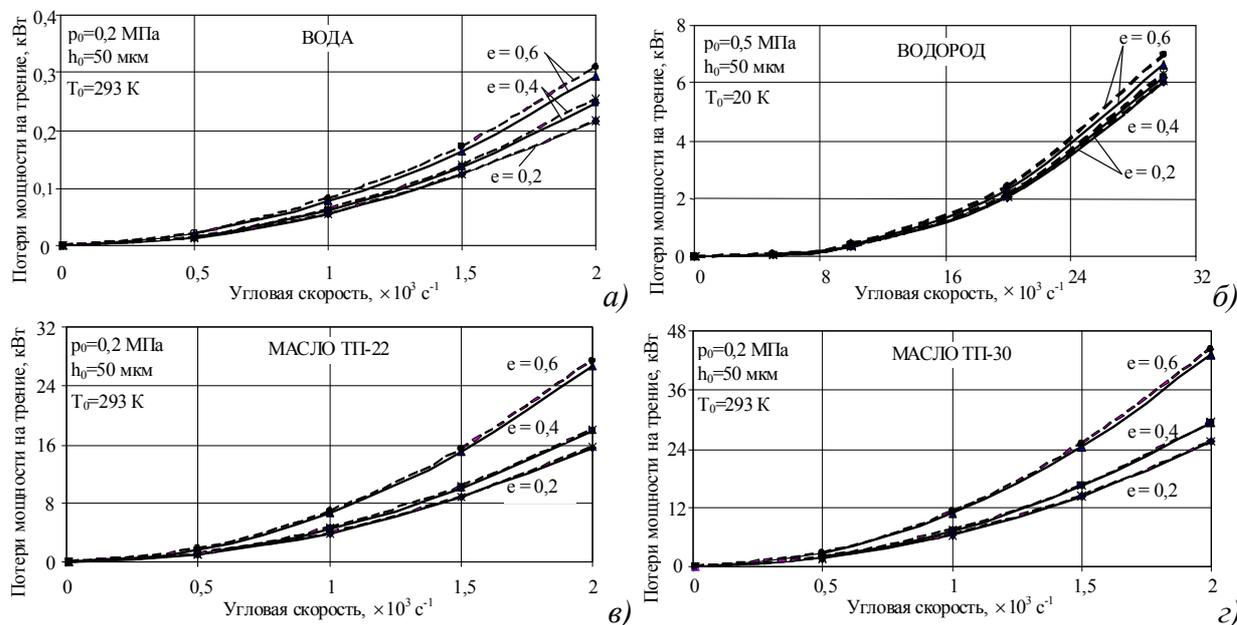


Рисунок 4 – Потери мощности на трение конических ГСП

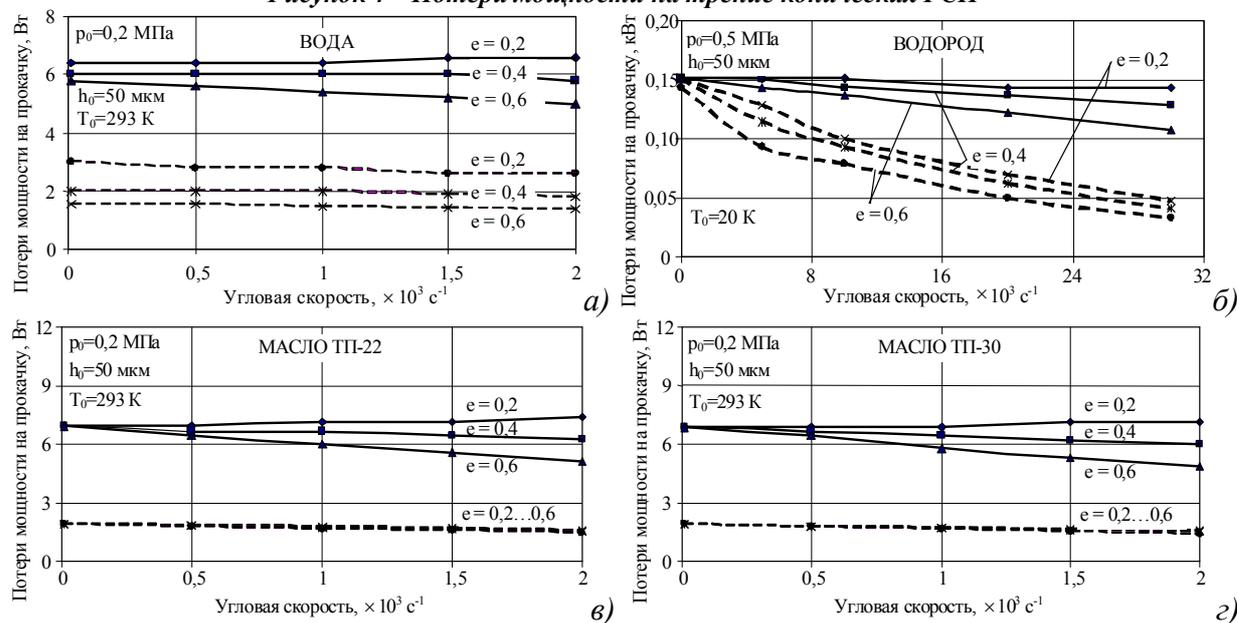


Рисунок 5 – Потери мощности на прокачку конических ГСП

Обобщая результаты расчетов по приведенным выше графикам можно отметить, что увеличение относительного радиального эксцентриситета и угловой скорости  $\omega_0$  приводит к возрастанию несущей способности и потерь мощности на трение и к снижению массового расхода и связанных с этим потерь мощности на прокачку смазочного материала. Приведенные результаты иллюстрируют основные закономерности работы конических гидростатических подшипников с прямоугольными и точечными камерами в размерной форме и дают возможность сравнения соответствующих характеристик с целью предоставления рекомендаций по применению того или иного типа подшипника в конкретной турбомашине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование гидростатических подшипников / Под ред. Г.Риппела (пер. с англ.). – М.: Машиностроение, 1967. – 136 с.
2. Корнеев, А.Ю. Конические подшипники жидкостного трения: моногр. / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.
3. Корнеев, А.Ю. Математическая модель неизотермического турбулентного течения смазочного материала в конических опорах жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин // Вестник машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 37 – 42.
4. Корнеев, А.Ю. Расчет статических характеристик конических опор жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 12. – С. 37 – 41.
5. Максимов, В.А. Высокоскоростные опоры скольжения гидродинамического трения / В.А. Максимов, Г.С. Баткис. – Казань: изд-во «Фэн», 2004. – 406 с.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610593. «Подшипник-Криоген» / Л.А. Савин, О.В. Соломин, А.Ю. Корнеев и др.

**Корнеев Андрей Юрьевич**

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»

Тел. (4862) 41-98-49

E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

A.Yu. KORNEYEV

**THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STATIC CHARACTERISTICS OF THE CONICAL EXTERNALLY PRESSURIZED BEARINGS WITH POINT AND RECTANGULAR RECESSES**

*The calculating correlations for determination of the static characteristics of the conical externally pressurized bearings under conditions of variable thermo-physical properties of lubricant are offered. The expressions allow to get the static characteristics (load-carrying capacity, flow rate, frictional and pumping losses) of the conical externally pressurized bearings with point and rectangular recesses. The results are illustrated by the plots for the conical externally pressurized bearings with water, liquid hydrogen and turbine oils lubricants.*

**Keywords:** conical externally pressurized bearing with point recesses, conical externally pressurized bearing with rectangular recesses, static characteristics, lubricant.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Proektirovanie gidrostaticheskikh podshipnikov / Pod red. G.Rippela (per. s angl.). – M.: Mashino-stroenie, 1967. – 136 s.
2. Korneev, A.Ju. Konicheskie podshipniki zhidkostnogo trenija: monogr. / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin. – M: Mashino-stroenie-1, 2008. – 172 s.
3. Korneev, A.Ju. Matematicheskaja model' neizotermicheskogo turbulentnogo techenija smazochnogo materiala v konicheskikh oporah zhidkostnogo trenija / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin // Vestnik mashino-stroenija. – 2005. – № 7. – S. 37 – 42.
4. Korneev, A.Ju. Raschet staticheskikh harakteristik konicheskikh opor zhidkostnogo trenija / A.Ju. Kor-neev, L.A. Savin, O.V. Solomin // Vestnik mashino-stroenija. – 2006. – № 12. – S. 37 – 41.
5. Maksimov, V.A. Vysokoskorostnye opory skol'zhenija gidrodinamicheskogo trenija / V.A. Maksimov, G.S. Batkis. – Kazan': izd-vo «Fjen», 2004. – 406 s.
6. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM № 2000610593. «Podshipnik-Kriogен» / L.A. Savin, O.V. Solomin, A.Ju. Korneev i dr.

**Korneev Andrey Yurievich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Dynamics and strength of machines”

Tel.: 4862-41-98-49

E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

И.В. КОРОГОДИНА, М.А. ТАРАСОВА

## РЕАЛИЗАЦИЯ СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ СВЯЗЕЙ ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

*Рассмотрены междисциплинарные связи физики и математики. Показан генезис связи и его исторические аспекты. Дано понятие «междисциплинарная связь», приведены ведущие понятия физики и математики и показано их обобщающее междисциплинарное значение. Показаны проблемы при изучении в школе и вузе и пути решения этих проблем.*

*Ключевые слова:* физика, математика, генезис связи, величина, переменная, функция, интеграл, производная, уравнение.

Физика (от древнегреч. φύσις «природа») – наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие и фундаментальные закономерности явлений природы, свойства и строение материи, законы ее движения и определяющая структуру и эволюцию материального мира. Законы физики рассматривают проблемы происхождения, устройства и организации окружающей действительности. Поэтому физика – одна из особо важных дисциплин, преподаваемых в технических вузах, которая имеет мировоззренческое назначение, формирует фундамент, являющийся основой других прикладных наук.

Предметной областью математики выступают количественные отношения и пространственные формы. Уже на ранних этапах развития естествознания физические свойства материального объекта или явления природы стали описывать, опираясь на соответствующий математический аппарат. Сравнение количественных характеристик физических величин, применение математических отношений для выражения законов окружающего мира определили ведущую роль математики в описании явлений природы.

Более того, математика, как наука, в ходе развития естествознания стала выступать и в качестве языка физики, и качестве инструмента для изучения явлений и объектов окружающего мира, как существующих областей, так и тех, которые можно «сконструировать».

История зарождения, становления и развития физики и математики позволяет проследить генезис связи этих наук (рис. 1). В этой связи можно выделить три этапа их развития: становление естествознания (до XVI в.); аналитическая стадия (XVII–XVIII в.в.) и синтетическая стадия (XIX–XX в.в.).

На этапе становления естествознания внимание ученых и философов привлекали физические явления окружающего мира. Получили развитие первые физические теории: учения о движении и материи (Демокрит, Эпикур, Лукреций, Аристотель); простейшие законы статики (Архимед); учение о свете (Платон, Евклид, Альгазен); начала гидростатики (Архимед); геоцентрическая система мира (Птолемей); гелиоцентрическая картина мира (Н. Коперник) и др. Количественные соотношения между физическими величинами устанавливались посредством математики, где самой простой процедурой связи между физикой и математикой выступал счет (сложение, вычитание, деление, умножение), который давал целые, рациональные и иррациональные значения физических величин.

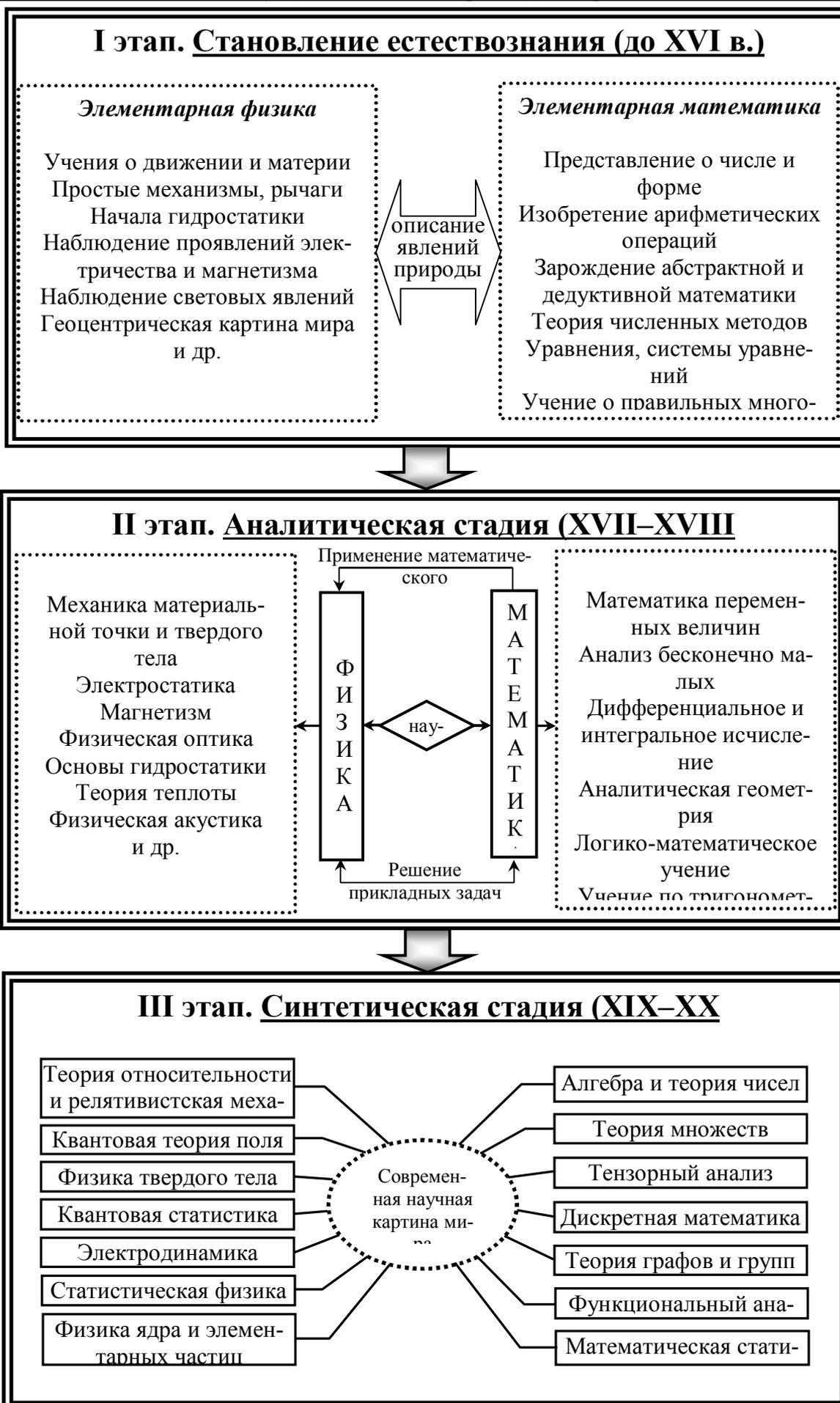


Рисунок 1 – Генезис связи физики и математики

Потребности в численном описании явлений природы стали основой зарождения и становления элементарной математики: представление о числе и форме (Архимед, ал-Хорезми, ал-Каши, С. Стевин); изобретение арифметических операций дедуктивной математики (Ф. Милетский, школа Пифагора, Гиппократ Хиоский, Демокрит, Евдокс, Аристотель, Евклид, Архимед, Аполоний); теория численных методов (Н. Орем, О. Хайям, ); решения уравнений и их систем (С. Ферро, Ф. Виет, Дж. Кордано); учение о правильных многоугольниках (школа Пифагора, И. Мюллер) и др.

В XVII веке были созданы объективные предпосылки для вычленения из наук отдельно физики и математики, связь между которыми осуществлялась посредством решения прикладных физических задач средствами математического аппарата, что соответствует новому этапу становлению физики и математики - аналитической стадии.

Дифференциальное и интегральное исчисления и выходящие из них конструкции (дифференциальные уравнения, теория комплексной переменной, вариационное исчисление и т.д.) стали активно привлекаться для построения моделей реальных процессов и описания физических теорий.

На этапе синтетической стадии естествознания (XIX-XX в.в.) связь физики с математикой, оставаясь по существу не менее тесной, приобретает более сложные формы. При этом границы между науками смещаются в сторону интеграции с целью построения современной картины мира. Возникающие в результате непосредственных запросов естествознания математические теории явились основой и стимулом для создания новых направлений в физике (например, квантовая физика на основе теории групп, теория электромагнитного поля на основе векторного анализа и теории поля и т.д.). По мере роста абстрактности естествознания математика становится языком науки, и особенно физики.

Генезис связи физики и математики актуализировал потребность расширения математического аппарата для описания физических явлений, способствовал развитию научных представлений об окружающей действительности и созданию современной научной картины мира. Это позволило выявить объективный характер взаимосвязи между этими науками, который находит отражение в реализации содержательных междисциплинарных связей физики с математикой в условиях технического вуза (таблица 1).

Таблица 1 – Междисциплинарные связи физики и математики

СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ СВЯЗИ ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ			
НАУЧНЫЕ ПОНЯТИЯ	ЗАКОНЫ	ТЕОРИИ	МЕТОДЫ НАУКИ
Величина, переменная, отношение, уравнение, функция, вектор, производная, интеграл и др.	Законы арифметических операций, метрические соотношения в треугольнике, операции с векторами и др.	Функциональный анализ, теория чисел, аксиомы геометрии, векторный анализ, интегральные преобразования и др.	Наблюдение, моделирование, эксперимент, интегрирование дифференциальных уравнений и др.

Анализ образовательных программ по физике и математике основного, среднего и высшего образования, исследование научно-методических подходов в преподавании, а также практика работы в вузе показывают, что связи между дисциплинами многообразны, постоянны и определяются, прежде всего, наличием общей предметной области.

Общность фактов и понятий, которые позволяют объединять знания об объектах и явлениях и помогают раскрытию как физических, так и математических теорий, определяются содержательными междисциплинарными связями: научные понятия, законы, теории, методы науки, реализующимися в учебном процессе школы и технического вуза.

При изучении физических явлений и математических теорий важная роль принадлежит обобщающим ведущим научным понятиям: величина, переменная, отношение, уравнение, функция, вектор, производная и интеграл. Они находят широкое применение в препода-

вании дисциплин «Физика» и «Математика» на всех этапах обучения. Поэтому их целесообразно называть обобщающими ведущими междисциплинарными понятиями физики и математики.

В качестве примера рассмотрим некоторые обобщающие ведущие междисциплинарные научные понятия.

В математике понятие «величина» рассматривается как особое свойство реальных объектов, особенность которого заключается в том, что его можно измерить. Ещё в начальной школе подчеркивается, что величины называются однородными, если выражают одно и то же свойство объектов, например, длина стола или длина комнаты. В школьном курсе математики рассматривают свойства величин: сравнение, сложение (вычитание), умножение (деление). При этом основной упор делается на их однородность (только по длине, площади, пр.).

В высшей школе математическое понятие «величина» рассматривается как характеристика физических объектов материального мира. В курсе физики она понимается как общая в качественном отношении для множества объектов, но индивидуальная для каждого из них в количественном отношении. Под значением физической величины понимают ее оценку, выражаемую произведением отвлеченного числа на принятую для данной физической величины единицу. При этом широко применяются весь математический аппарат арифметических операций. В курсе физики рассматривают и как скалярные величины (емкость, индуктивность, время, др.), так и векторные (скорость, перемещение, вектор магнитной индукции, др.).

Таким образом, научное понятие «величина» имеет междисциплинарный характер и может быть положено в основу содержательных связей физики и математики при обучении в высшей школе.

Понятие «переменная» возникло в математике в XVII веке под влиянием запросов естествознания, выдвинувшего на первый план изучение процессов (движения), а не состояний. Это понятие не укладывалось в формы, выработанное математикой древности и средних веков, и требовало для своего выражения новых форм, которыми явились буквенная алгебра и аналитическая геометрия Р. Декарта. В буквах декартовой алгебры нашли свое символическое выражение переменные величины.

В курсе математики технического вуза под «переменной» обычно понимают численную величину, множество принимаемых значений которой включено во множество вещественных чисел. Множество всех значений, которые может принимать данная переменная, называются областью её изменения.

В методике преподавания физике «переменная» – это некоторый атрибут модели реального физического процесса, принимающий количественные значения, физическая величина. Множество значений, которые может принимать конкретная переменная, определяется из физических соображений. Физические переменные связываются друг с другом посредством формул, в результате чего получают математические модели различной степени сложности, описывающие реальные процессы окружающей действительности.

Иными словами, понятие «переменная» позволяет использовать математический аппарат для решения конкретных задач, в том числе и технического характера, реализуя содержательные междисциплинарные связи физики и математики.

В общей системе теоретических знаний обучающихся по физике и математике в высшей школе большое место занимает понятие «функция», которое имеет познавательное и мировоззренческое значение и играет важную роль в реализации междисциплинарных связей.

Функция является одним из основных математических понятий, выражающих зависимость одних переменных величин от других. Как и остальные понятия математики, оно сложилось не сразу, а прошло долгий путь развития от представлений о переменной величине до теории множеств.

В курсе математики трактовка понятия «функция» сводится к отражению связи между элементами множеств. В то же время данное понятие играет и в физике исключительную

роль. По существу любой физический закон лишь тогда считается, четко сформулирован, когда ему придана математическая форма, точнее – если он записан в виде некоторой функциональной зависимости между физическими величинами.

Важно учитывать и другой факт, что не всякая формула, связывающая физические величины, выражает причинно-следственную зависимость между ними. В ряде случаев аналитическая запись отражает лишь определенное соответствие между физическими величинами. Примерами могут служить формулы для расчета плотности твердых тел или удельной теплоты плавления.

В результате активного использования функциональных зависимостей в курсе физики технического вуза у студентов формируются:

- междисциплинарные умения, связанные с аналитической формулой функциональной зависимости (распознавание вида функциональной зависимости; нахождения области определения функции и др.);

- междисциплинарные умения, связанные с графиком функции – строить график; определять интервалы, где функция возрастает (убывает); указывать области «знакопостоянства» функции; находить наибольшее (наименьшее) значения функции и абсциссы точек, в которых эти значения достигнуты и др.

Необходимость решения прикладных задач, связанных с анализом функции, заданной аналитическим или графическим методом, создает основу для повышения мотивации изучения и самой математики. Кроме того, систематическое использование «междисциплинарности» при рассмотрении функциональных зависимостей помогает обучающимся преодолеть барьер между курсами физики и математики в техническом вузе. На второй ступени обучения и в магистратуре появляется мотивация использовать функциональный метод при исследовании явлений, процессов, при конструировании устройств.

Особого внимания заслуживает понятие «вектор». В курсе математики вектор есть направленный отрезок, т.е. отрезок у которого указаны начало (точка приложения вектора) и конец. В курсе физики вектор – это величина, которая характеризуется своим численным значением и направлением. Векторная форма уравнений в сочетании с соответствующими рисунками раскрывает физическую ситуацию в задаче и предопределяет, как показывает опыт, успешное ее решение. Такая форма облегчает алгебраическую запись уравнения движения или условий равновесия. В высшей школе активно реализуются дидактические возможности применения векторного исчисления при изучении физики (от координатного метода до векторного поля).

При решении физических задач используются математические понятия о векторах: одинаково (противоположно) направленные, модуль вектора, равенство векторов, нулевой вектор, проекции вектора на заданное направление, пр.

При работе с векторами формируются и межпредметные умения и навыки, а именно, изображение векторной величины направленным отрезком; построение суммы, разности векторов и произведения вектора на число; распознавание коллинеарных векторов в формуле и выяснение их сонаправленности или противоположенности в зависимости от значения параметра; разложение вектора по двум неколлинеарным векторам; нахождение координат вектора; нахождение направления вектора по его координате; переход от соотношений векторов к соотношению их координат и длин.

Учитывая значение и роль понятие вектор в учебных курсах технического вуза можно констатировать его роль в осуществлении междисциплинарных связей физики и математики.

Одними из основных междисциплинарных понятий математики выступают понятия «производная» и «интеграл». Физика в формировании понятия производная играет не пассивную роль средства наглядности, а дает возможность представить предельный переход в динамике и осмыслить понятие «бесконечно малой величины». Для курса физики знание производной и интеграла открывает перспективу в плане возможности более строгого определения ряда физических величин; упрощение работ с графиками, а также в построении и анализе математической модели, в основе которой находятся уравнения математического

анализа (уравнения Максвелла, кинематические уравнения, уравнения термодинамики, уравнения колебаний и волн, др.). Решение прикладных задач по физике убеждает студентов в необходимости овладения аппаратом математического анализа.

В этой связи можно отнести понятия «производная» и «интеграл» к междисциплинарным, на основании которых возможна реализация содержательных связей между физикой и математикой.

Изучая вопросы преемственности учебных программ, мы отмечаем, что методика преподавания физики в техническом вузе опирается на школьный учебный материал. Обучающиеся, осуществляя переход от описания явлений к построению математической модели, не только расширяют свои знания и представления об окружающем мире, но и получают возможность применить их при решении практических задач, используя обобщающие ведущие междисциплинарные понятия физики и математики.

Реализация содержательных междисциплинарных связей посредством обобщающих научных понятий усиливает преемственность в преподавании физики при переходе от школьной к вузовской программе, что способствует формированию у обучающегося целостной системы знаний.

Учет содержательных междисциплинарных связей физики и математики в условиях технического вуза, увеличение доли включения математики в курсе физики, решение задач прикладной направленности развивают интерес студентов к изучению этих дисциплин, повышают их уровень знаний, способствуют формированию современного научного мировоззрения будущих инженеров.

В то же время физика и математика считаются довольно трудными предметами вузовского курса для студентов первых годов обучения. Учитывая, генезис связи наук, в результате которого направление научной мысли развивались взаимосвязано, стимулируя обоюдодострый процесс, многие элементы интеграции с математикой могут сделать изложение физики более ясным и доступным. Более того, опыт работы со студентами показывает, что непонимание ими какого-либо вопроса из курса физики часто связаны с отсутствием навыков анализа функциональных зависимостей, составления и решения математических уравнений, неумением проводить алгебраические преобразования и геометрические построения, отсутствием вычислительных навыков и др. Вузовская математика практически везде, к сожалению, совершенно оторвана от потребностей физики – как по содержанию учебного материала, так и по его трактовкам, постановке задач и развитию междисциплинарных навыков.

Невнимание к физике причиняет урон и самой математике, затрудняя ее понимание и притупляя мотивацию к её изучению. Не используемый в физике математический аппарат плохо держится в памяти студентов, что негативно отражается и на изучение технических дисциплин на более старших курсах технического вуза.

Анализ содержания вузовских курсов физики и математики позволил выделить основные трудности, затрудняющие реализацию содержательных междисциплинарных связей, а именно: отставание по времени в изучении отдельных разделов математики; использование различных терминологий по отношению к одним конструкциям и свойствам; несоответствие между символикой курсов физики и математики.

Современное преподавание требует органического выявления сути физических законов на основе междисциплинарных научных понятий, законов, теорий и методов математики. Поэтому поиск инновационных подходов должен обеспечить повышение уровня физических и математических знаний студентов, способствовать формированию логического мышления обучающихся, а также влиять на осознание единства материального мира и созданию современного научного мировоззрения будущих инженеров.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Корогодина, И.В. К вопросу о преемственности программ по физике основного общего, среднего (полного) и высшего профессионального образования [Текст] / И.В. Корогодина, М.А. Тарасова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Педагогика и психология». – 2009. – № 3. – С. 206-214.

2. Корогодина, И.В. Научно-исследовательская деятельность студентов как средство интеграции курсов физики и математики в образовательной среде классического университета [Текст] / И.В. Корогодина // Классическое университетское образование для XXI века: доступность, эффективность, качество: Сборник научных трудов Шестой Международной заочной научно-методической конференции: В 2 ч. Ч. 1. – Саратов: Из-во «Издательский Центр «Наука», 2009. – С. 247-250.

3. Корогодина, И.В. Проблемы преемственности школьного и вузовского физического образования [Текст] / И.В. Корогодина, М.А. Тарасова // Тезисы докладов Совещания заведующих кафедрами физики вузов России. Научный семинар. / Под ред. проф. Г.Г. Спирина – Москва: АПР, 2009. – С. 169-171.

**Корогодина Ирина Витальевна**

Академия ФСО России

Кандидат педагогических наук, ст. преподаватель кафедры физики

E-mail: E KOROGODIN@yandex.ru

**Тарасова Маргарита Александровна**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Кандидат технических наук, доцент кафедрф физики

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: martar1@yandex.ru

---

I.V. KOROGODINA, M.A. TARASOVA

**REALIZATION OF SUBSTANTIAL INTERDISCIPLINARY  
COMMUNICATIONS OF PHYSICS AND MATHEMATICS  
IN TECHNICAL COLLEGE**

*Interdisciplinary communications of physics and mathematics are considered. Genesis of communication and its historical aspects is shown. The concept «interdisciplinary communication» is given, leading concepts of physics and mathematics are resulted and their generalizing interdisciplinary value is shown. Problems are shown at studying at school and high school and a way of the decision of these problems.*

**Keywords:** physics, mathematics, communication genesis, size, variable, function, integral, a derivative, the equation.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Korogodina, I.V. K voprosu o preemstvennosti programm po fizike osnovnogo obwego, srednego (polnogo) i vysshego professional'nogo obrazovanija [Tekst] / I.V. Korogodina, M.A. Tarasova // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Pedagogika i psihologija». – 2009. – № 3. – С. 206-214.

2. Korogodina, I.V. Nauchno-issledovatel'skaja dejatel'nost' studentov kak sredstvo integracii kursov fiziki i matematiki v obrazovatel'noj srede klassicheskogo universiteta [Tekst] / I.V. Korogodina // Klassicheskoe universitetskoe obrazovanie dlja XXI veka: dostupnost', jeffektivnost', kachestvo: Sbornik nauchnyh trudov Shestoj Mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-metodicheskoj konferencii: V 2 ch. Ch. 1. – Saratov: Iz-vo «Izdatel'skij Centr «Nauka», 2009. – S. 247-250.

3. Korogodina, I.V. Problemy preemstvennosti shkol'nogo i vuzovskogo fizicheskogo obrazovanija [Tekst] / I.V. Korogodina, M.A. Tarasova // Tezisy dokladov Sovewanija zavedujuwih kafedrami fiziki vuzov Rossii. Nauchnyj seminar. / Pod red. prof. G.G. Spirina – Moskva: APR, 2009. – S. 169-171.

**Korogodina Irina Vitalievna**

Academy of Federal Protective Service of Russia

Candidate of pedagogical science, senior teacher of department “Physics”

E-mail: E KOROGODIN@yandex.ru

**Tarasova Margarita Aleksandrovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Physics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: martar1@yandex.ru

М.В. ХОРОШИЛОВА

## ЭЛЕКТРОННОЕ И ФОНОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА АТОМАРНЫМ ВОДОРОДОМ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ

*При протекании на поверхности тонких золотых пленок, напыленных на поверхность кремния, гетерогенной реакции  $H + H \rightarrow H_2$  происходит электронное и фононное возбуждение металла. Электронное возбуждение приводит к возникновению хемоЭДС на контактах структуры золото-кремний и изменению электропроводности структуры, а также к частичному распылению золотой пленки с наиболее дефектных участков поверхности.*

**Ключевые слова:** поверхность тонких плёнок, поверхность кремния, гетерогенная реакция, электронное возбуждение, структура золото-кремний, электропроводность.

### ВВЕДЕНИЕ

При гетерогенной рекомбинации атомов водорода, протекающей по ударному механизму Или-Ридила и механизму рекомбинационной десорбции Ленгмюра-Хиншельвуда, поверхность твердого тела получает энергию порядка 1 эВ [1-4]. Возбуждение поверхности происходит и при рекомбинации преадсорбированных атомов [5-7]. Релаксация возбужденных химических связей на поверхности обусловлена генерацией фононов или возникновением возбужденных состояний электронов твердого тела. О возбуждении электронной подсистемы поверхности свидетельствуют неравновесная электропроводность [8, 9], люминесценция полупроводников [9, 10] и эмиссия электронов в газовую среду [9, 11]. В общем случае перенос заряда на поверхности всегда сопутствует процессам адсорбции [12]. Электронная аккомодация в металлах и ее роль в ускорении гетерогенных химических процессов является мало изученной.

В работе описаны обусловленные электронным возбуждением поверхности тонкой золотой пленки эффекты изменения сопротивления структуры золото-кремний, возникновение хемоЭДС на ней. Уровень фононного возбуждения не может обеспечить эффект распыления атомов пленки в виду высокой теплопроводности кристаллической решетки, эффект обусловлен возбуждением электронной подсистемы металла при рекомбинации атомов водорода на его поверхности. Обнаружено влияние на указанные эффекты времени выдержки образцов в среде атомно-молекулярного водорода, что объясняется диффузией протонов через металлическую пленку и их проникновение в полупроводник, что влияет на его электронные свойства, кроме того частичное распыление золотых пленок на поверхности полупроводников приводит к неконтролируемому изменению количества центров адсорбции.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Для электронного возбуждения поверхности твердых тел использовалась гетерогенная реакция рекомбинации атомов водорода  $H+H \rightarrow H_2$ . Через реактор непрерывно прокачивали водород чистотой 99,995 % при давлении 50 Па. Диссоциацию молекул водорода осуществляли с помощью высокочастотного разряда в газе. Из разрядной трубки в реактор поступала смесь атомов и молекул водорода, находящихся в основных электронных и колебательных состояниях. Концентрация атомов водорода в реакторе, измеренная методом термозонда, равнялась  $n = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . С помощью термопары и терморезистора установлено, что увеличение температуры образцов в результате протекания на их поверхности реакции рекомбинации атомов водорода не превышает 0,2 К.

При выводе возбужденных электронов через потенциальный барьер на межфазной границе металл-полупроводник в качестве образцов использовались структуры, состоящие из пленки золота толщиной  $d = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  и  $d = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , нанесенной на кристаллы кремния р- и n-типа. Для удаления окисной пленки кристаллы непосредственно перед напылением золота обрабатывались смесью кислот  $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:3$ . Перед измерениями образцы обрабатыва-

лись атомарным водородом для очистки напыленной пленки от адсорбированных молекул в течение 3 часов при комнатной температуре.

Структуру металл-полупроводник включали в измерительную цепь и помещали в проточный реактор. К металлической пленке присоединяли «точечный» контакт, а нижнюю грань кристалла (без напыленного металла) прижимали к металлической пластине держателем из диэлектрика.

Для измерения сопротивления образца применялся прибор УПИП-60М, который объединяет в себе измерительный потенциометр и одинарный мост постоянного тока. В опытах контролировали изменение со временем сопротивлений  $R_n$  и  $R_p$  структур металл-полупроводник, где  $R_n$  – сопротивление структуры при ее включении в цепь минусом источника тока к металлической пленке и плюсом к омическому контакту, а  $R_p$  – сопротивление этой структуры при противоположной полярности подключения этого же источника. Кроме того, исследовали изменение сопротивлений  $R_n$  и  $R_p$  под действием света. Измеряли разность потенциалов между полупроводником и напыленной металлической пленкой (хемоЭДС) при протекании гетерогенной химической реакции на поверхности пленки, а также ток короткого замыкания структуры, обусловленный действием хемоЭДС. Для измерения разности потенциалов (хемоЭДС) использовали микровольтметр Ф-116, а также УПИП-60М в режиме потенциометра. Ток короткого замыкания измеряли с помощью микроамперметра Ф-116.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Появление атомов водорода в газовой среде влияет на сопротивление структур металл-полупроводник, причем это влияние наблюдается только в том случае, если к пленке золота присоединен минус источника тока. После включения источника атомарного водорода сопротивление  $R_n$  структур металл-полупроводник испытывает скачкообразное уменьшение (на величину  $\Delta R_n$ ), новое значение сопротивления ( $R_n^*$ ) в среде атомов водорода не меняется со временем (на интервалах  $\sim 10^2$  с). После выключения источника атомов водорода это сопротивление скачком приобретает прежнее значение. В тех же условиях появление атомов Н в газовой среде не влияет на величину  $R_p$ . При увеличении приложенного к структуре металл-полупроводник электрического напряжения  $U$  величина  $\Delta R_n$  наблюдаемых скачкообразных изменений величины  $R_n$  убывает (рис. 1, кривые 1 и 1\*), при этом аналогичная величина  $\Delta R_p$  остается равной нулю (рис. 1, кривые 2 и 2\*). Отношение сопротивления структуры металл-полупроводник при включенном источнике атомарного водорода  $R^*$  к ее сопротивлению при выключенном разряде  $R$  зависит от величины и полярности приложенного напряжения  $U$  и испытывает скачкообразное изменение при  $U = 0$  (вставка на рис. 1).

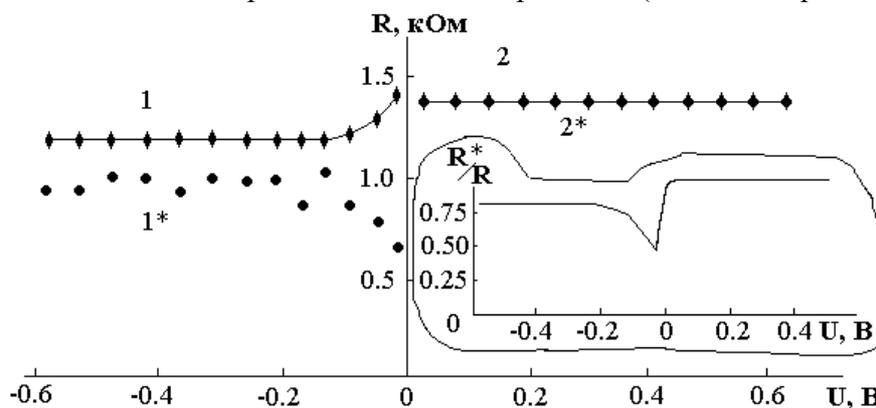


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления контакта «пленка золота-кремний n-типа» от величины и полярности электрического напряжения на этом контакте в молекулярном (1, 2) и атомарном (1\*, 2\*) водороде (при измерении значений  $R$  в среде атомарного водорода источник атомов водорода включался на 7 с). К пленке золота присоединен: 1, 1\* - минус источника тока; 2, 2\* - плюс источника тока.  $d = 3 \cdot 10^{-8}$  м;  $T = 295$  К

Используя равенства  $I = \frac{U}{R_n}$ ,  $I^* = \frac{U}{R_n^*}$ , где  $I$  и  $I^*$  – сила тока через структуру металл-

полупроводник при выключенном и соответственно включенном источнике атомарного водорода, можно написать:  $\Delta I = I^* - I = e\eta JS$ ,

$$\eta = \frac{U}{eJS} \left( \frac{1}{R_n^*} - \frac{1}{R_n} \right), \quad (1)$$

где  $\eta = \beta_1\beta_2$ ;  $\beta_1$  – вероятность образования электронно-возбужденного состояния в металле при образовании молекулы продукта;

$\beta_2$  – вероятность прохождения горячего электрона через металлическую пленку и межфазную границу;

$J$  – скорость гетерогенной реакции;

$S$  – площадь поверхности металлической пленки;

$e$  – заряд электрона;

$R_n$  – сопротивление структуры металл-полупроводник в среде молекулярного водорода при ее включении в цепь минусом источника напряжения к пленке золота;

$R_n^*$  – сопротивление структуры металл-полупроводник в среде атомарного водорода при ее включении в цепь минусом источника напряжения к пленке золота.

Используя измеренные в опытах значения  $R_n(U)$  и  $R_n^*(U)$  (рис. 1), с помощью выражения (1) вычислена величина  $\eta$  при разных значениях приложенного между пленкой золота и полупроводником напряжения  $U$ . При этом скорость реакции вычислялась по формуле  $J = 0.25 n_a c \gamma$ , где  $n_a$  – концентрация атомов водорода в газовой среде;  $c$  – средняя скорость их теплового движения;  $\gamma$  – коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов водорода на поверхности золота ( $\gamma = 0.1$ ). Когда плюс источника тока присоединен к пленке Au, а минус – к полупроводнику, тогда  $\eta = 0$ . При смене полярности приложенного напряжения наблюдается значительный рост величины  $\eta$  при увеличении приложенного напряжения  $U$  (рис. 2). Этот результат означает, что вероятность прохождения горячего электрона через межфазную границу  $\beta_2$  зависит от  $U$ .

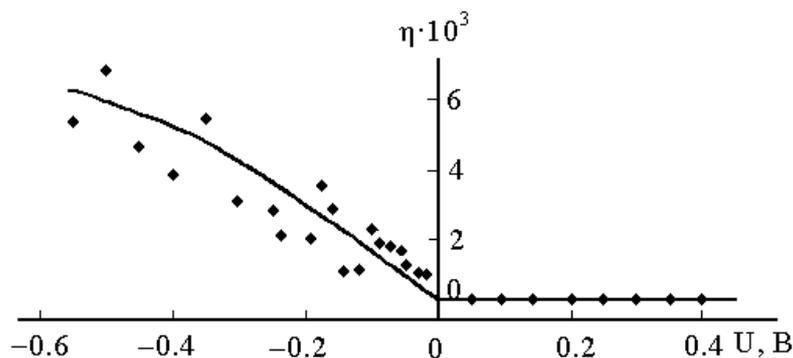


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента  $\eta$  от величины и полярности электрического напряжения, приложенного между пленкой золота и кремнием n-типа.  $d = 3 \cdot 10^{-8}$  м;  $T = 295$  К

Величины  $\Delta R_n$ ,  $V$  и  $I_0$  сильно зависят от длительности выдержки (на интервалах  $\tau \sim 10^4$  с) структуры металл-полупроводник в среде атомарного водорода: изменяясь симбатно, зависимости  $\Delta R_n(\tau)$ ,  $V(\tau)$  и  $I_0(\tau)$  проходят через максимум, затем величины  $\Delta R_n$ ,  $V$  и  $I_0$  со временем уменьшаются до нуля. В тех же условиях сопротивление структуры металл-полупроводник (величин  $R_n$  и  $R_p$ ) от длительности ее выдержки  $\tau$  в среде атомов водорода зависит незначительно (для измерений величин  $\Delta R_n(\tau)$ ,  $R_n(\tau)$  и  $R_p(\tau)$  разряд периодически выключали на 7 с). Если после длительной «темновой» паузы ( $\sim 10^4$  с), в течение которой обра-

зец находился в среде молекулярного водорода, включить разряд, то кинетические кривые  $\Delta R_n(\tau)$ ,  $V(\tau)$  и  $I_0(\tau)$  вновь проходят через максимум (рис. 3, 4).

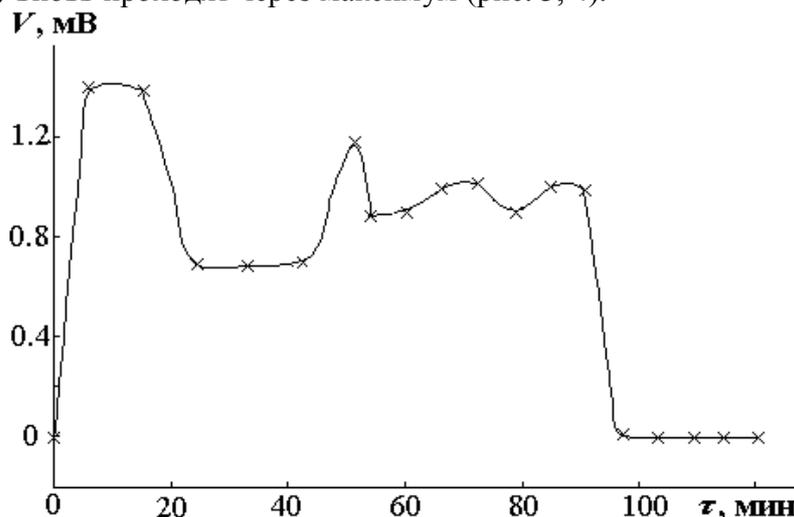


Рисунок 3 – Зависимость величины  $V$  от времени выдержки структуры «пленка золота-кремний n-типа» в среде атомарного водорода после предварительной «темновой» паузы 14 часов,  $d = 3 \cdot 10^{-8}$  м;  $T = 295$  К

Влияние длительной выдержки образцов в среде атомарного водорода на величины наблюдаемых неравновесных эффектов (рис. 3, 4), по-видимому, обусловлено разнообразными процессами на границе металл-полупроводник и металл-газовая среда. Согласно данным прямых измерений в условиях опытов наблюдается адсорбция атомов водорода на поверхности металлов ( $Pt$ ,  $Cu$ ,  $Ni$ ). Адсорбированные на поверхности металлов атомы водорода могут находиться в нейтральном состоянии и в виде положительно заряженных ионов.

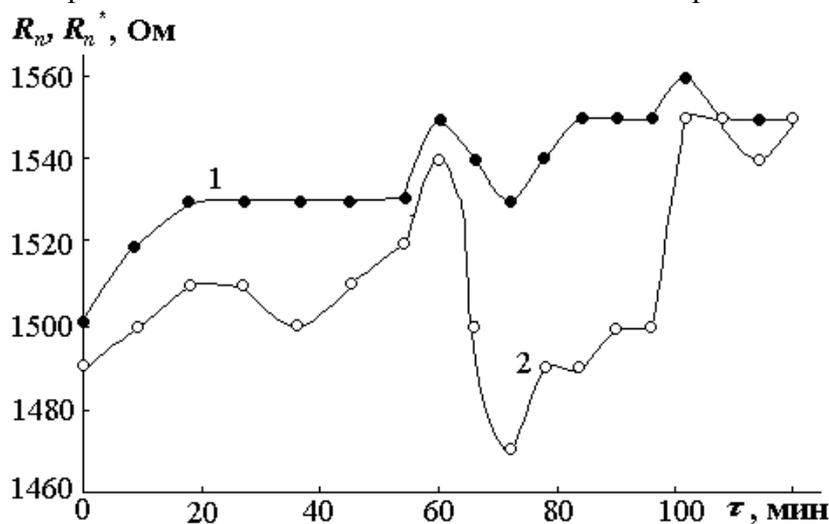


Рисунок 4 – Зависимость величин  $R_n(1)$  и  $R_n^*(2)$  от времени выдержки структуры «пленка золота-кремний n-типа» в среде атомарного водорода после предварительной «темновой» паузы 14 часов (при измерении величин  $R_n$  источник атомов водорода периодически выключали на 7 с),  $d = 3 \cdot 10^{-8}$  м;  $T = 295$  К

Диффузия протонов через пленку золота и их адсорбция на границе металл-полупроводник меняет величину потенциального барьера на границе металл-полупроводник, что влияет на прохождение равновесных и неравновесных электронов через эту границу. При этом меняются измеряемые в опытах величины  $R_n$ ,  $R_n^*$ ,  $V$  и  $I_0$ .

Выдержка пленок золота в среде атомарного водорода в течение (10-20) часов приводит к потере ими металлического блеска вследствие распыления: вначале оголяется поверх-

ность подложки вблизи ее краев, затем граница между подложкой и пленкой золота перемещается внутрь образца. Пленка Au толщиной  $1 \cdot 10^{-7}$  м частично удаляется за 20 часов обработки атомами водорода (средняя скорость распыления равна  $10^{-12}$  мс<sup>-1</sup>). При этом коэффициент распыления, то есть отношение числа выбитых атомов Au к числу молекул H<sub>2</sub>, образовавшихся на поверхности при рекомбинации атомов водорода, составляет в среднем величину  $4 \cdot 10^{-5}$ . Изучение структуры пленок золота, выдержанных в среде атомарного водорода, с помощью микроскопа Axioscop 2 MAT (увеличение 50-200 раз) показало, что в процессе распыления пленка распадается на островки, часто имеющие форму многоконечных звезд. Причем остатки пленки сохраняются в наиболее дефектных участках поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в данной работе материал, полученный на основании специально поставленной цели и полученных экспериментальных данных, позволяет использовать его для выяснения причин фононного возбуждения, применения сопротивления структуры золото-кремний под влиянием возбуждения электронной подсистемы металла при рекомбинации атомов водорода на его поверхности. Количественные результаты экспериментов могут служить основой для построения математических моделей рассмотренных процессов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов, В. П. Скорость химической реакции [Текст] / В. П. Жданов. – Новосибирск. – Наука, 1986. – 101 С.
2. Яблонский, Г. С. Кинетика модельных реакций гетерогенного катализа [Текст] : В. И. Быков, В. И. Елохин. - Новосибирск: Наука. 1984. – 223 С.
3. Гранкин, В. П. Электронные состояния на поверхности цинк-сульфидных кристаллофосфоров [Текст] / В.П. Гранкин // Журнал прикл. спектроскопии. – 1998. – Т. 63. – № 3. – С. 403 - 406.
4. Гранкин, В. П., Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел по данным хемолюминесценции [Текст] / В.П. Гранкин, Ю.В. Климов, Ю. И. Тюрин // Журнал физ. химии. – 1996. – Т. 70. - № 10. – С. 1863 – 1868.
5. Кинетика адсорбции и рекомбинации атомов водорода на поверхности твердых тел [Текст] / В.Ф. Харламов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. - № 5. – С. 23 – 27.
6. Харламов, В. Ф. Влияние захвата атомов в преадсорбционные состояния на кинетику их гетерогенной рекомбинации на поверхности твердых тел [Текст] / В.Ф. Харламов // Журнал физ. химии. – 1997. – Т. 71. - № 4. – С 672 – 676.
7. Предсорбционные состояния атомов водорода и кислорода на поверхности твердых тел [Текст] / В.Ф. Харламов [и др.] // Тезисы докладов IV Всероссийского симпозиума «Актуальные проблемы адсорбционных процессов». ИХФ РАН. – 1998. – С. 132.
8. Механизмы и эффективность электронного возбуждения полупроводников в актах химических превращений на поверхности / В.Ф. Харламов [и др.] // Теор. и exper. химия. – 1978. – Т. 14. – С. 788 – 795.
9. Стыров, В.В. Высокоэффективная электронная аккомодация при взаимодействии атомарного водорода с монокристаллом германия [Текст] / В.В. Стыров, А.Е. Кабанский // ЖЭТФ. – 1979. – Т. 76. – С. 1803 – 1807.
10. Харламов, В. Ф. Рекомбинация атомов на поверхности тел и сопутствующие эффекты [Текст] / В.Ф. Харламов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 207 с.
11. Харламов, В.Ф. Релаксационные методы для определения механизма образования продукта в ходе каталитических реакций [Текст] / В.Ф. харламов // Кинетика и катализ. – 2005. – Т. 46. – С. 297.
12. Лифшиц, В.Г. Процессы на поверхности твердых тел [Текст] В.Г. Лившец, С.М. Репинский. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 704 с.

### Хорошилова Маргарита Вячеславовна

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс (Госуниверситет – УНПК)  
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе 29,  
контактный телефон: 8 (4862) 41-98-89,  
факс: 8(4862) 41-66-84; 43-26-01,  
E-mail: Shorkin@ostu.ru

**ELECTRONIC AND FONONIC EXCITATION OF THIN FILMS OF GOLD BY ATOMIC HYDROGEN AND ATTENDANT EFFECTS**

*At course on a surface of the thin gold films which have been raised dust on a surface of silicon, heterogeneous reaction  $H + H \rightarrow H_2$  occurs electronic and excitation-metal denie metal. Electronic excitation leads to occurrence khemo-eds on kontak structures gold-silicon and to change structure electro-conductivity structures, and also to partial dispersion of a gold film from the most defective sites of a surface.*

**Keywords:** *surface of thin films, surface of silicon, heterogeneous reaction, electronic excitation, structure gold-silicon, electroconductivity.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Zhdanov, V. P. Skorost' himicheskoj reakcii [Tekst] / V. P. Zhdanov. – Novosibirsk. – Nauka, 1986. – 101 S.
2. Jablonskij, G. S. Kinetika model'nyh reakcij geterogennogo kataliza [Tekst] : V. I. Bykov, V. I. Elohin. Novosibirsk: Nauka. 1984. – 223 S.
3. Grankin, V. P. Jelektronnye sostojanija na poverhnosti cink-sul'fidnyh kristallofosforov [Tekst] / V.P. Grankin // Zhurnal prikl. spektroskopii. – 1998. – T. 63. – № 3. – S. 403 - 406.
4. Grankin, V. P., Rekombinacija atomov vodoroda na poverhnosti tverdyh tel po dannym hemoljumnescencii [Tekst] / V.P. Grankin, Ju.V Klimov, Ju. I. Tjurin // Zhurnal fiz. himii. – 1996. – T. 70. - № 10. – S. 1863 – 1868.
5. Kinetika adsorbicii i rekombinacii atomov vodoroda na poverhnosti tverdyh tel [Tekst] / V.F. Harlamov [i dr.] // Pis'ma v ZhTF. – 1998. – T. 24. - № 5. – S. 23 – 27.
6. Harlamov, V. F. Vlijanie zahvata atomov v predadsorbcionnye sostojanija na kinetiku ih geterogen-noj rekombinacii na poverhnosti tverdyh tel [Tekst] / V.F. Harlamov // Zhurnal fiz. himii. – 1997. – T. 71. - № 4. – S 672 – 676.
7. Predsorbcionnye sostojanija atomov vodoroda i kisloroda na poverhnosti tverdyh tel [Tekst] / V.F. Harlamov [i dr.] // Tezisy dokladov IV Vserossijskogo simpoziuma «Aktual'nye problemy adsorbcion-nyh processov». IHF RAN. – 1998. – S. 132.
8. Mehanizmy i jeffektivnost' jelektronnogo vzbuzhdenija poluprovodnikov v aktah himicheskikh pre-vravenij na poverhnosti / V.F. Harlamov [i dr.] // Teor. i jeksper. himija. – 1978. – T. 14. – S. 788 – 795.
9. Styrov, V.V. Vysokoeffektivnaja jelektronnaja akkomodacija pri vzaimodejstvii atomarnogo vodo-roda s monokristallom germanija [Tekst] / V.V. Styrov, A.E. Kabanskij // ZhJeTF. – 1979. – T. 76. – S. 1803 – 1807.
10. Harlamov, V. F. Rekombinacija atomov na poverhnosti tel i soputstvujuwie jeffekty [Tekst] / V.F. Harlamov. – Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1994. – 207 s.
11. Harlamov, V.F. Relaksacionnye metody dlja opredelenija mehanizma obrazovanija produkta v hode kataliticheskikh reakcij [Tekst] / V.F. harlamov // Kinetika i kataliz. – 2005. – T. 46. – S. 297.
12. Lifshic, V.G. Processy na poverhnosti tverdyh tel [Tekst] V.G. Livshec, S.M. Repinskij. – Vla-divostok: Dal'nauka, 2003. – 704 s.

**Horoshilova Margarita Vyacheslavovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of physical-mathematical science, associate professor of department “Physics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-66-84, 43-26-01,

E-mail: Shorkin@ostu.ru

В.К. МАНЖОСОВ, И.А. НОВИКОВА

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ ЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ НА ГРАНИЦЕ СОПРЯЖЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ С УПРУГОЙ ПРОКЛАДКОЙ

*Рассмотрен процесс преобразования продольной волны деформации на границе разнородных стержней с упругой прокладкой. Изложена методика расчета процесса преобразования волны деформации линейной формы. Предложена форма представления аналитических зависимостей с использованием относительных величин, определяющих параметры формируемых волн.*

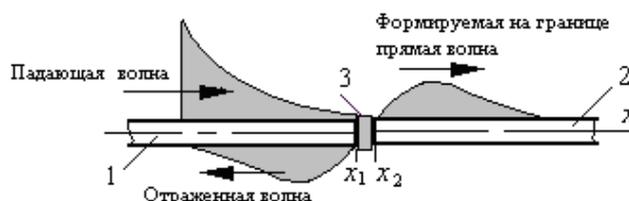
**Ключевые слова:** волна деформации, волновые уравнения, метод бегущих волн, преобразование волны деформации, стержневая система, сопряжение стержней с упругой прокладкой.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [3] рассмотрена задача о преобразовании продольной волны деформации на границе разнородных стержней с упругой прокладкой. Предложена процедура численного решения дифференциальных уравнений, описывающих процесс преобразования волны. В данной работе представлено аналитическое решение задачи, когда падающая волна описывается линейной функцией. Постановка такой задачи создает предпосылки построения новых алгоритмов численного решения и моделирования, когда волна деформации произвольной формы аппроксимируется кусочно-линейными участками.

Изложим представления о процессе преобразования волны деформации при прохождении через сопряжение разнородных участков стержня с упругой прокладкой.

Два полуограниченных разнородных стержня 1 и 2 (рис. 1) в сечениях  $x = x_1$  и  $x = x_2$  разделены упругой прокладкой 3. Инерционными свойствами упругой прокладки пренебрегаем, учитывая лишь её упругие свойства.



**Рисунок 1 – Схема стержневой системы при падающей волне деформации**  
1, 2 - стержни системы; 3 - упругая прокладка

На границу  $x = x_1$  со стороны стержня 1 падает прямая волна. Параметры падающей волны считаются известными. Требуется определить формируемую в сечении  $x = x_2$  прямую волну, распространяющуюся в направлении оси  $x$  по стержню 2, и обратную волну, формирующуюся в сечении  $x = x_1$  и распространяющуюся по стержню 1 в другом направлении.

Движение сечений рассматриваемой динамической системы описывается волновыми уравнениями

$$\frac{\partial^2 u_1(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1^2} \frac{\partial^2 u_1(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a_2^2} \frac{\partial^2 u_2(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $u_1(x,t)$ ,  $u_2(x,t)$  – смещения сечений соответственно 1-го и 2-го стержней,

$a_1$ ,  $a_2$  – скорости распространения волн деформаций в стержнях;

$x$  – координата поперечного сечения,

$t$  – время.

Начальное состояние системы описывается равенствами:

$$\text{при } t=0 \quad u_1(x,0) = u(x), \quad u_2(x,0) = 0, \quad \frac{\partial u_1(x,0)}{\partial t} = v(x), \quad \frac{\partial u_2(x,0)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Граничные условия рассматриваемой динамической системы имеют вид:

для сопряженных сечений  $x_1$  и  $x_2$

$$E_1 A_1 \frac{\partial u_1(x_1, t)}{\partial x} = E_2 A_2 \frac{\partial u_2(x_2, t)}{\partial x}, \quad E_2 A_2 \frac{\partial u_2(x_2, t)}{\partial x} = -k [u_1(x_1, t) - u_2(x_2, t)], \quad (3)$$

$$\text{для } x = -\infty \quad E_1 A_1 \frac{\partial u_1(-\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \text{для } x = \infty \quad E_2 A_2 \frac{\partial u_2(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где  $k$  – жесткость упругого элемента;

$E_1, E_2$  – модули упругости материалов стержней;

$A_1, A_2$  – площади поперечных сечений стержней.

Решения волновых уравнений (1) по методу бегущих волн [1, 2] представим в виде:

$$u_1(x, t) = f_1(a_1 t - x) + \varphi_1(a_1 t + x), \quad -\infty \leq x \leq 0; \quad u_2(x, t) = f_2(a_2 t - x) + \varphi_2(a_2 t + x), \quad 0 \leq x \leq \infty,$$

где  $\varphi_2(a_2 t + x)$  – функция, описывающая обратную волну в стержне 2.

В работе [3] показано, что при заданных начальных условиях функция  $\varphi_2(a_2 t + x) = 0$ , а формируемая в сечении  $x = x_1$  обратная волна  $\varphi_1'(a_1 t + x_1)$  определяется как

$$\varphi_1'(a_1 t + x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} f_2'(a_2 t - x_2) + f_1'(a_1 t - x_1). \quad (5)$$

Формируемая в сечении  $x = x_2$  прямая волна  $f_2(a_2 t + x_2)$  определяется из решения дифференциального уравнения [5]:

$$f_2''(a_2 t - x_2) + \frac{k(r+1)}{E_2 A_2 r} f_2'(a_2 t - x_2) = \frac{2ka_1}{E_2 A_2 a_2} f_1'(a_1 t - x_1), \quad (6)$$

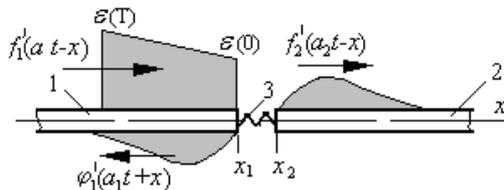
где  $r = \frac{E_1 A_1}{E_2 A_2} \frac{a_2}{a_1}$  – отношение волновых сопротивлений стержня 1 и стержня 2.

Обозначим отношения  $\frac{k(r+1)}{E_2 A_2 r} = \alpha, \quad \frac{2ka_1}{E_2 A_2 a_2} = \beta$ . Тогда из (6)

$$f_2''(a_2 t - x_2) + \alpha f_2'(a_2 t - x_2) = \beta f_1'(a_1 t - x_1). \quad (7)$$

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ

Введём переменную  $\xi = a_2 t - x_2$ . Решение дифференциального уравнения (7) представим как



$$f_2'(\xi) = V(\xi) \cdot Z(\xi), \quad V(\xi) = C_1 \cdot e^{-\alpha \xi},$$

$$Z(\xi) = \int \frac{\beta f_1'(a_1 t - x_1)}{V(\xi)} d\xi + C_2, \quad (8)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Рисунок 2 – Схема стержневой системы при падающей волне деформации  
1, 2 – стержни системы; 3 – упругий элемент

Рассмотрим постановку задачи, когда функция  $f_1'(a_1 t - x_1)$  является линейной (рис. 2). Совместим начало координат с положением сечения  $x_2$  (полагаем, что  $x_2 = 0$ ). Тогда

$$f_1'(a_1 t - x_1) = \begin{cases} \varepsilon(0) + \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{T} \cdot t = \varepsilon(0) + \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{a_1 T} \cdot \xi, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\varepsilon(0)$  – значение функции  $f_1'(a_1t - x_1)$  при  $t = 0$ ;

$\varepsilon(T)$  – значение функции  $f_1'(a_1t - x_1)$  при  $t = T$ ;

$T$  – длительность действия падающей волны.

Учитывая (9) в (8) при определении функции  $Z(\xi)$ , находим на интервале  $0 \leq t \leq T$

$$Z(\xi) = \frac{\beta}{C_1} \left\{ \frac{\varepsilon(0)}{\alpha} + \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{a_2 T} \left[ \frac{1}{\alpha^2} (\alpha\xi - 1) \right] \right\} \exp(\alpha\xi) + C_2. \quad (10)$$

Решение (7) с учётом (8) и найденного значения функции  $Z(\xi)$  на интервале  $0 \leq t \leq T$  примет вид

$$f_2'(\xi) = V(\xi) \cdot Z(\xi) = \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \varepsilon(0) + \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} [(\alpha\xi - 1)] \right\} + C \cdot \exp(-\alpha\xi), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (11)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдём из условия, что в начальный момент времени при  $\xi = 0$  упругий элемент не деформирован и значение  $f_2'(0) = 0$ . Тогда из (11) при  $\xi = 0$  имеем

$$C = -\frac{\beta}{\alpha} \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right]. \quad (12)$$

Подставив значение  $C$  в (11), получим после преобразований

$$f_2'(\xi) = \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha\xi)) + \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \cdot \alpha\xi \right\}, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (13)$$

Решение (13) позволяет описать формирование прямой волны в стержне 2 для различных линейных форм падающих волн. Если  $\varepsilon(0) = 0$  (падающая волна имеет треугольную форму с увеличением интенсивности), то из (13) следует

$$f_2'(\xi) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\varepsilon(T)}{\alpha a_2 T} (\alpha\xi - 1 + \exp(-\alpha\xi)), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (14)$$

Если  $\varepsilon(T) = 0$  (падающая волна имеет треугольную форму с уменьшением интенсивности), то из (13) следует

$$f_2'(\xi) = \varepsilon(0) \frac{\beta}{\alpha} \left[ \left( 1 + \frac{1}{\alpha a_2 T} \right) (1 - \exp(-\alpha\xi)) - \frac{t}{T} \right], \quad 0 \leq t \leq T. \quad (15)$$

Если  $\varepsilon(0) = \varepsilon(T)$  (падающая волна имеет прямоугольную форму), то из (13) следует

$$f_2'(\xi) = \varepsilon(0) \frac{\beta}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha\xi)), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Рассмотрим процесс формирования волны деформации  $f_2'(\xi)$  после завершения действия падающей волны на интервале  $t \geq T$ , когда  $f_1'(a_1t - x_1) = 0$ . Учитывая в (9) при определении функции  $Z(\xi)$ , что на интервале  $t \geq T$  функция  $f_1'(a_1t) = 0$ , находим

$$Z(\xi) = \int \frac{\beta f_1'(a_1t - x_1)}{V(\xi)} d\xi + C_2 = C_2, \quad t \geq T,$$

а решение (7) с учетом (8) на интервале  $t \geq T$  представим как

$$f_2'(\xi) = C \cdot \exp(-\alpha\xi), \quad t \geq T. \quad (16)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдём из условия сопряжения временных интервалов, полагая, что в момент времени  $t = T$  значение функции  $f_2'(\xi)$  можно определить из (13) при  $t = T$ :

$$f_2'(a_2T) = \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(\alpha a_2 T)) + \varepsilon(T) - \varepsilon(0) \right\}. \quad (17)$$

Из (16) при  $t = T$  следует

$$f_2'(a_2T) = C \cdot \exp(-\alpha a_2T), \quad C = f_2'(a_2T) \cdot \exp(\alpha a_2T).$$

Подставив в (16), получим

$$f_2'(\xi) = f_2'(a_2T) \cdot \exp(-\alpha a_2(t-T)), \quad t \geq T,$$

а с учётом (17) имеем

$$f_2'(\xi) = \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 T)) + \varepsilon(T) - \varepsilon(0) \right\} \cdot \exp(-\alpha a_2(t-T)), \quad t \geq T. \quad (18)$$

Итак, если функция  $f_1'(a_1t - x_1)$  является линейной и описывается уравнениями (9), то функция прямой волны  $f_2'(a_2t - 0)$  имеет вид

$$f_2'(a_2t - 0) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 t)) + (\varepsilon(T) - \varepsilon(0)) \frac{t}{T} \right\}, & 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \\ \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \varepsilon(0) - \frac{\varepsilon(T) - \varepsilon(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 T)) + \varepsilon(T) - \varepsilon(0) \right\} \exp(-\alpha a_2 T(t/T - 1)), & \frac{t}{T} \geq 1. \end{cases}$$

Из (5) функция обратной волны  $\varphi_1'(a_1t - x_1)$  определяется как

$$\varphi_1'(a_1t - x_1) = -\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1} \frac{a_1 a_2}{a_1 a_2} f_2'(a_2t - 0) + f_1'(a_1t - x_1) = -\frac{1}{r} \frac{a_2}{a_1} f_2'(a_2t - 0) + f_1'(a_1t - x_1).$$

Для большей универсальности целесообразно перейти к относительным величинам при определении падающей и формируемых волн.

Так относительное значение функции падающей прямой волны

$$\tilde{f}_1'(a_1t - x_1) = \frac{f_1'(a_1t - x_1)}{\varepsilon_{\max}} = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}(0) + \frac{\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)}{a_2 T} \cdot \xi, & \tilde{\varepsilon}(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon_{\max}}, \quad \tilde{\varepsilon}(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_{\max}}, \quad 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases}$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальное значение функции  $f_1'(a_1t - x_1)$  на интервале  $0 \leq t \leq T$ .

Максимальное значение функции  $f_1'(a_1t - x_1)$  равно либо  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon(0)$ , если  $\varepsilon(0) > \varepsilon(T)$ ; либо  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon(T)$ , если  $\varepsilon(0) < \varepsilon(T)$

Относительное значение функции формируемой в сечении  $x_2 = 0$  прямой волны

$$\tilde{f}_2'(a_2t - 0) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 t)) + (\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)) \frac{t}{T} \right\}, & 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \\ \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 T)) + \tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0) \right\} \cdot \exp(-\alpha a_2 T(t/T - 1)), & \frac{t}{T} \geq 1. \end{cases}$$

$$\tilde{f}_2'(a_2t - 0) = \frac{f_2'(a_2t - 0)}{\varepsilon_{\max}}, \quad \tilde{\varepsilon}(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon_{\max}}, \quad \tilde{\varepsilon}(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_{\max}}.$$

Если  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon(0)$ , то  $\tilde{\varepsilon}(0) = 1$ ,  $\tilde{\varepsilon}(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon(0)}$ , а относительные значения функций

$$\tilde{f}_1'(a_1t - x_1) = \begin{cases} 1 + \left( \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon(0)} - 1 \right) \cdot \frac{t}{T}, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases}$$

$$\tilde{f}'_2(a_2t-0) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ 1 - \frac{\tilde{\varepsilon}(T)-1}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 t)) + (\tilde{\varepsilon}(T)-1) \frac{t}{T} \right\}, & 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \\ \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ 1 - \frac{\tilde{\varepsilon}(T)-1}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 T)) + \tilde{\varepsilon}(T)-1 \right\} \cdot \exp(-\alpha a_2 T(t/T-1)), & \frac{t}{T} \geq 1. \end{cases}$$

Если  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon(T)$ , то  $\tilde{\varepsilon}(T) = 1$ ,  $\tilde{\varepsilon}(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(T)}$ , а относительные значения функций

$$\tilde{f}'_1(a_1t-x_1) = \frac{f'_1(a_1t-x_1)}{\varepsilon(T)} = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}(0) + \frac{1-\tilde{\varepsilon}(0)}{a_2 T} \cdot \xi, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases}$$

$$\tilde{f}'_2(a_2t-0) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{1-\tilde{\varepsilon}(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 t)) + (1-\tilde{\varepsilon}(0)) \frac{t}{T} \right\}, & 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \\ \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{1-\tilde{\varepsilon}(0)}{\alpha a_2 T} \right] (1 - \exp(-\alpha a_2 T)) + 1 - \tilde{\varepsilon}(0) \right\} \exp(-\alpha a_2 T(t/T-1)), & \frac{t}{T} \geq 1. \end{cases}$$

Относительное значение функции обратной волны, формируемой в сечении  $x = x_1$

$$\tilde{\varphi}'_1(a_1t-x_1) = \frac{\varphi'_1(a_1t-x_1)}{\varepsilon_{\max}} = -\frac{1}{r} \frac{a_2}{a_1} \tilde{f}'_2(a_2t-0) + \tilde{f}'_1(a_1t-x_1).$$

При расчете значений  $\tilde{f}'_2(a_2t-0)$  и  $\tilde{\varphi}'_1(a_1t-x_1)$  целесообразно учитывать, что

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2}, \quad \alpha a_2 t = \tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{t}, \quad \alpha a_2 T = \tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}, \quad \frac{t}{T} = \frac{t}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{T} = \frac{\tilde{t}}{\tilde{T}},$$

где  $\tilde{k} = \frac{k \cdot \Delta l}{E_2 A_2}$  – отношение жесткости упругого элемента к продольной жесткости единицы

длины стержня 2,

$\Delta l$  – единица длины стержня 2;

$\Delta T = \frac{\Delta l}{a_2}$  – время прохождения волной деформации расстояния  $\Delta l$  во втором стержне;

$\tilde{t} = \frac{t}{\Delta T}$  – отношение текущего времени  $t$  к  $\Delta T$ ;

$\tilde{T} = \frac{T}{\Delta T}$  – отношение длительности падающей волны  $T$  к  $\Delta T$ .

С учетом представленных равенств имеем

$$\tilde{f}'_1(a_1t-x_1) = \frac{f'_1(a_1t-x_1)}{\varepsilon_{\max}} = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}(0) + [\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)] \cdot \frac{\tilde{t}}{\tilde{T}}, & 0 \leq \tilde{t} \leq \tilde{T}, \\ 0, & \tilde{t} \geq \tilde{T}, \end{cases} \quad (19)$$

$$\tilde{f}'_2(a_2t-0) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)}{\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}} \right] (1 - \exp(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{t})) + (\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)) \frac{\tilde{t}}{\tilde{T}} \right\}, & 0 \leq \frac{\tilde{t}}{\tilde{T}} \leq 1, \\ \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \left[ \tilde{\varepsilon}(0) - \frac{\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0)}{\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}} \right] (1 - \exp(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T})) + \tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0) \right\} \exp(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}(\frac{\tilde{t}}{\tilde{T}} - 1)), & \frac{\tilde{t}}{\tilde{T}} \geq 1, \end{cases} \quad (20)$$

$$\tilde{\varphi}'_1(a_1t - x_1) = -\frac{1}{r} \frac{a_2}{a_1} \tilde{f}'_2(a_2t - 0) + \tilde{f}'_1(a_1t - x_1). \quad (21)$$

Аналитические зависимости (19), (20) и (21) являются более универсальными при анализе влияния тех или иных параметров механической системы на процесс преобразования волны, так используют безразмерные величины или отношение величин одной размерности.

**ПРИМЕР РАСЧЕТА. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ВОЛНЫ**

Предположим, что подходящая к упругому элементу волна деформации имеет прямоугольную форму (рис. 3).

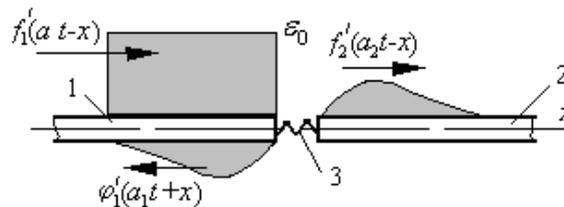


Рисунок 3 – Схема стержневой системы

Используя формулы (19), (20), (21) и учитывая, что  $\tilde{\varepsilon}(T) - \tilde{\varepsilon}(0) = 0$ ,  $\tilde{\varepsilon}(0) = 1$ , имеем

$$\tilde{f}'_1(a_1t - x_1) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tilde{t} \leq \tilde{T}, \\ 0, & \tilde{t} \geq \tilde{T}, \end{cases} \quad \tilde{\varphi}'_1(a_1t - x_1) = -\frac{1}{r} \frac{a_2}{a_1} \tilde{f}'_2(a_2t - 0) + \tilde{f}'_1(a_1t - x_1), \quad (22)$$

$$\tilde{f}'_2(a_2t - 0) = \begin{cases} \frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \left(1 - \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{t}\right)\right), & 0 \leq \tilde{t} \leq \tilde{T}, \\ \frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \left(1 - \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}\right)\right) \cdot \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} (\tilde{t} - \tilde{T})\right), & \tilde{t} \geq \tilde{T}. \end{cases} \quad (23)$$

Функция  $\tilde{f}'_2(a_2t - 0)$  представляет произведение двух величин, одна из которых постоянная  $\frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2}$ , а вторая – переменная  $\left(1 - \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{t}\right)\right)$  на интервале  $0 \leq \tilde{t} \leq \tilde{T}$  или  $\left(1 - \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} \tilde{T}\right)\right) \cdot \exp\left(-\tilde{k} \frac{r+1}{r} (\tilde{t} - \tilde{T})\right)$  на интервале  $\tilde{t} \geq \tilde{T}$ .

Постоянная  $\frac{2r}{r+1} \cdot \frac{a_1}{a_2} = Q_{1,2}$  (где  $Q_{1,2}$  – коэффициент прохождения падающей прямой

волны  $\tilde{f}'_1(a_1t - x_1)$  при идеальном сопряжении стержней [2]). Величина этого коэффициента зависит от отношения волновых сопротивлений стержня 1 и стержня 2, т.е. от величины  $r = E_1 A_1 a_2 / E_2 A_2 a_1$ .

Рассмотрим преобразование прямоугольной волны на границе сопряжения стержней с упругой прокладкой при равенстве волновых сопротивлений ( $r = 1$ ).

В таблице 1 представлены результаты расчета параметров трансформированной волны  $\tilde{f}'_2(a_2t - 0)$  на основе аналитического расчета по формулам (23) и численного расчета при моделировании процесса (методология численного расчета изложена нами в [5]). Результаты представлены для следующих параметров стержневой системы: падающая волна прямоугольной формы с относительной длительностью  $\tilde{T} = T / \Delta T = 1$ , отношение волновых сопротивлений  $r = 1$ , скорости распространения волн  $a_1 = a_2$ .

Таблица 1 – Результаты расчета параметров трансформированной волны  $\tilde{f}'_2(a_2t - 0)$  на основе аналитического расчета по формулам (23) и численного расчета при моделировании процесса

Время, $t/T$	Падающая волна, $\tilde{f}'_1(a_1t - x_1)$	Трансформированная волна $\tilde{f}'_2(a_2t - 0)$			
		Расчет по формулам	Моделирование	Расчет по формулам	Моделирование
		$\tilde{k} = 1$		$\tilde{k} = 2$	
0	1,0	0	0	0	0
0,1	1,0	0,181	0,179	0,329	0,324
0,2	1,0	0,329	0,327	0,550	0,544
0,3	1,0	0,451	0,448	0,698	0,692
0,4	1,0	0,550	0,547	0,798	0,792
0,5	1,0	0,632	0,628	0,864	0,859
0,6	1,0	0,698	0,695	0,909	0,905
0,7	1,0	0,753	0,750	0,939	0,935
0,8	1,0	0,798	0,795	0,959	0,956
0,9	1,0	0,834	0,832	0,972	0,970
1,0	1,0	0,864	0,862	0,981	0,980
1,1	0	0,707	0,707	0,658	0,662
1,2	0	0,579	0,580	0,441	0,447
1,3	0	0,474	0,476	0,296	0,302
1,4	0	0,388	0,390	0,198	0,204
1,5	0	0,318	0,320	0,133	0,138
1,6	0	0,261	0,263	0,089	0,093
1,7	0	0,213	0,216	0,059	0,063
1,8	0	0,175	0,177	0,040	0,042
1,9	0	0,143	0,145	0,027	0,029
2,0	0	0,117	0,119	0,018	0,019

Сопоставление значений, рассчитанных по аналитическим зависимостям (23) и при численном расчете, показывает их соответствие.

На рисунке 4 представлены диаграммы падающей волны  $f'_1(a_1t - x)$ , а также сформированных в сечении  $x = 0$  прямой волны  $f'_2(a_2t - x)$  и обратной волны  $\phi'_1(a_1t + x)$  в различные моменты времени в диапазоне  $0 \leq \tilde{t} \leq 2$ .

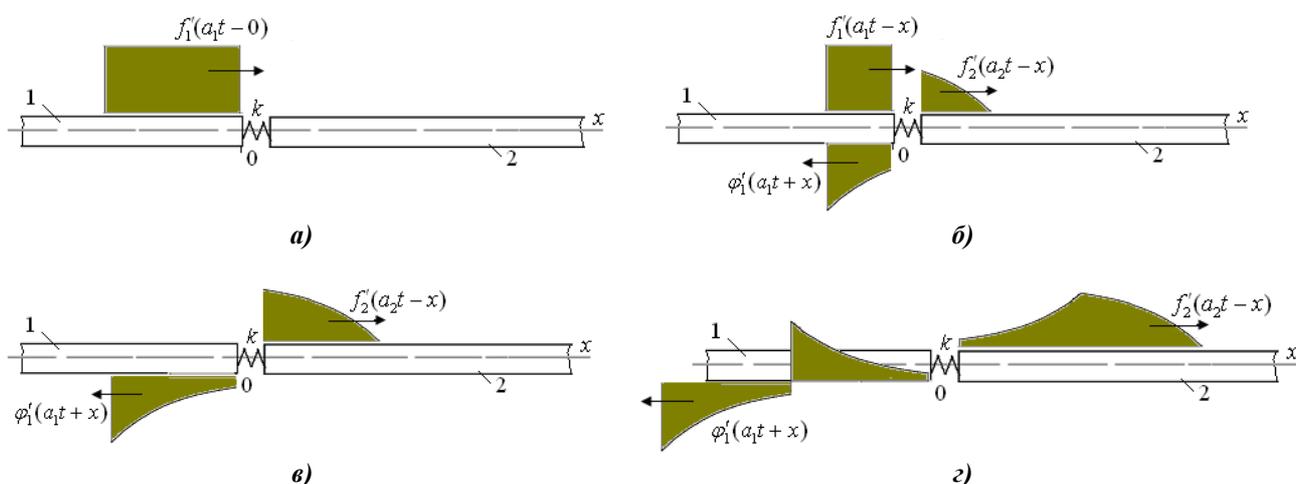


Рисунок 4 – Диаграммы формируемых прямых и обратных волн

а) диаграмма волны  $f'_1$  при  $\tilde{t} = 0$ ; б) диаграммы волн  $f'_1$ ,  $f'_2$ ,  $\phi'_1$  при  $\tilde{t} = 0,5$

в) диаграммы волн  $f'_2$ ,  $\phi'_1$  при  $\tilde{t} = 1$ ; з) диаграммы волн  $f'_2$ ,  $\phi'_1$  при  $\tilde{t} = 2$

В момент времени  $\tilde{t} = 0$  (рис. 4, а) падающая прямоугольная волна достигла границы сопряжения стержней 1 и 2. Дальнейший процесс связан с формированием прямой волны  $f_2'(a_2t - x)$  в стержне 2 и отраженной обратной волны  $\varphi_1'(a_1t + x)$  в стержне 1.

В момент времени  $\tilde{t} = 0,5$  (рис. 4, б) длина падающей волны уменьшилась в два раза, сформировалась часть прямой волны  $f_2'(a_2t - x)$  в стержне 2 и отраженной обратной волны  $\varphi_1'(a_1t + x)$  в стержне 1.

В момент времени  $\tilde{t} = 1$  (рис. 4, в) падающая прямоугольная волна прекратила своё действие. Сформированная в стержне 2 прямая волна  $f_2'(a_2t - x)$  достигает максимального значения, а обратная волна  $\varphi_1'(a_1t + x)$  в сечении  $x = x_1$  меняет знак (формируется обратная волна сжатия). Процесс формирования хвостовых участков прямой и обратной волн продолжается за счёт потенциальной энергии, накопленной в упругом элементе.

В момент времени  $\tilde{t} = 2$  (рис. 4, г) сформированные в стержне 2 прямая волна  $f_2'(a_2t - x)$  и в стержне 1 обратная волна  $\varphi_1'(a_1t + x)$  по длине в два раза превышают падающую волну  $f_1'(a_1t - x)$ . При равенстве волновых сопротивлений стержней хвостовые части прямой  $f_2'(a_2t - x)$  и обратной  $\varphi_1'(a_1t + x)$  волн одинаковы.

## ВЫВОДЫ

Анализируя полученные результаты, заметим, что трансформированная волна  $\tilde{f}_2'(a_2t - x_2)$  достигает максимального значения при  $t/T = 1$ . Форма волны  $\tilde{f}_2'(a_2t - x_2)$  существенно отличается от падающей прямоугольной волны.

По отношению к падающей волне длина сформированной в стержне 2 волны увеличилась практически в два раза. В сформированной волне можно выделить два участка: головной и хвостовой. Длина головного участка волны равна длине падающей прямоугольной волны.

Хвостовой участок волны формируется за счет потенциальной энергии упругого элемента, накопленной в период действия падающей прямоугольной волны.

Максимальное значение сформированной прямой волны  $\tilde{f}_2'(a_2t - x_2)$  меньше, чем у падающей волны. И эта разница тем больше, чем меньше жесткость упругого элемента.

Полученные аналитические зависимости позволяют анализировать влияние на процесс преобразования падающей волны линейной формы (треугольной с нарастающей интенсивностью, треугольной с убывающей интенсивностью, прямоугольной, трапецеидальной) жесткости упругого элемента, соотношения волновых сопротивлений стержней, длительности действия падающей волны, соотношения скоростей звука в материале сопряженных стержней.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009 – 2011 гг), ГК № П 1122*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов, О.Д. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М.: Наука, 1985. – 354 с.
2. Манжосов, В.К. Продольный удар / В.К. Манжосов. – Ульяновск: 2006. – 358 с.
3. Манжосов, В.К. Преобразование продольной волны деформации с убывающей интенсивностью на границе сопряжения стержней с упругой прокладкой / В.К. Манжосов, И.А. Новикова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. – № 2. С. 3 – 10.

**Манжосов Владимир Кузьмич**

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск  
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
 Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32  
 E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

**Новикова Ирина Александровна**

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск  
Старший преподаватель кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы»  
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32  
E-mail: tpm@ulstu.ru, nia@ulstu.ru

---

V.K. MANZHOSOV, I.A. NOVIKOVA

## **TRANSFORMATION OF LONGITUDINAL WAVE DEFORMATION LINEAR FORM AT THE BORDER OF ROD TRIMMING WITH RESILIENT PAD**

*The paper gives a review of transformation of longitudinal strain wave at the boundary of heterogeneous rods with elastic gasket. The article describes a technique for calculating the transformation of the strain wave of linear form. It is proposed to represent analytic dependencies by the use of relative values that define the parameters of generated waves.*

**Keywords:** strain wave, wave equations, traveling wave method, transformation of the strain wave, rod system, conjugation of rods with elastic gasket.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Alimov, O.D. Rasprostranenie voln deformacij v udarnyh sistemah / O.D. Alimov, V.K. Manzhosov, V. Je. Erem'janc. – M.: Nauka, 1985. 354 s.
2. Manzhosov, V.K. Prodol'nyj udar / V.K. Manzhosov. – Ul'janovsk: 2006.– 358 s.
3. Manzhosov, V.K. Preobrazovanie prodol'noj volny deformacii s ubyvujuwej intensivnost'ju na granice soprijazhenija sterzhnej s uprugoj prokladkoj / V.K. Manzhosov, I.A. Novikova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2010. – № 2. S. 3 – 10.

**Manzhosov Vladimir Kuzmich**

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk  
Doctor of technical science, professor, head of department “Theoretical and applied mechanics”  
Russia, 432027, Ulyanovsk, ul. Severnyi Venez, 32  
E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

**Novikova Irina Aleksandrovna**

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk  
Senior teacher of department “Measuring and Computing Complexes”  
Russia, 432027, Ulyanovsk, ul. Severnyi Venez, 32  
E-mail: tpm@ulstu.ru, nia@ulstu.ru

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 539.214

В.Д. КУХАРЬ, С.Е. СЕЛЕДКИН, А.Е. КИРЕЕВА

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

*В данной статье, приведен расчет напряженно-деформированного состояния при осадке тонколистовых заготовок на основе метода конечных элементов.*

*Ключевые слова:* обработка металлов давлением, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, метод конечных элементов, напряжения.

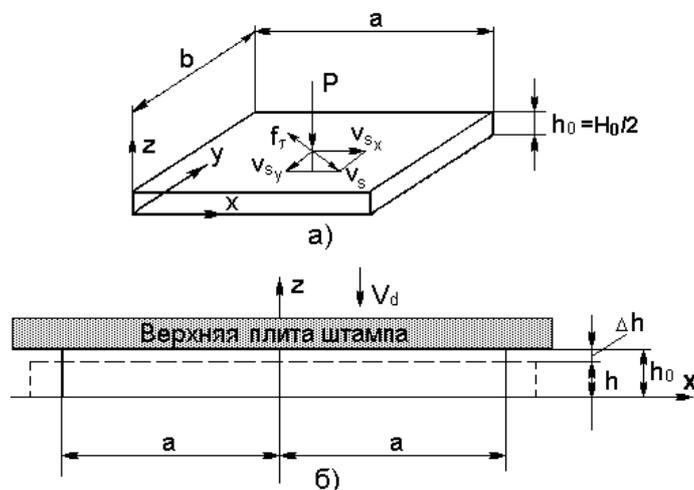
Ряд технологических процессов (штамповка тонкостенных панелей, прокатка тонкого листа и т.п.) можно рассматривать как задачи пластического сжатия тонкого слоя металла, толщина которого значительно меньше двух других его размеров, заключенного между жесткими поверхностями инструмента прессы, прокатного стана и других машин для обработки давлением.

Ниже предложен подход к расчету напряженно-деформированного состояния при осадке тонких листовых заготовок на основе метода конечных элементов [2].

При моделировании пластического течения тонколистовой заготовки, сжимаемой между параллельными шероховатыми плитами, вводятся следующие допущения.

1. Материал заготовки принимается изотропным, несжимаемым, упрочняющимся, подчиняющимся условию текучести Мизеса и ассоциированному закону течения. Обозначим начальное расстояние между плитами через  $H_0 = 2h_0$  и расположим систему координат, как указано на рисунке 1.

2. Все плоскости, перпендикулярные координате  $z$ , деформируются одинаково и остаются параллельными начальной координатной плоскости  $xOy$ . На каждом малом шаге деформирования во всех точках заготовки компоненты скоростей деформаций  $\xi_z = const$  и  $\eta_{yz} = \eta_{zx} = 0$ , а компоненты тензора напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_{xy}$  не изменяются по толщине заготовки и являются функции только координат  $x$ ,  $y$ .



*Рисунок 1 – Осадка тонколистовой заготовки между жесткими плитами  
а) система координат; б) схема деформирования*

3. Касательные напряжения  $\tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$ , переменные в плоскости  $xu$  и по толщине заготовки, на контактной поверхности равны  $\tau_k$  - касательному напряжению, обусловленному трением тела об инструмент. Значения указанных величин изменяются линейно по высоте заготовки и вследствие симметрии на середине высоты заготовки равны нулю:

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 2\tau_k z/h. \quad (1)$$

На контактной поверхности

$$\tau_k = mk, \quad (0 \leq m \leq 1), \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная пластичности материала;

$m$  – коэффициент трения по напряжению текучести.

Для аппроксимации области пластического течения используются призматические конечные элементы, толщина которых равна текущей толщине заготовки (рис. 2).

Для такого КЭ считаем справедливыми все сформулированные выше допущения. Варьированию в нем, в соответствии с принципом возможных перемещений, подвергаются узловые компоненты скоростей в плоскости  $xu$ . Компоненты скорости  $v_z$  внутри КЭ одинаковы в каждой точке элемента и в любой плоскости, параллельной плоскости  $xu$ , определяются по выражению  $V_z = -(V_d z)/h$ , где  $V_d$  - вертикальная скорость перемещения инструмента.

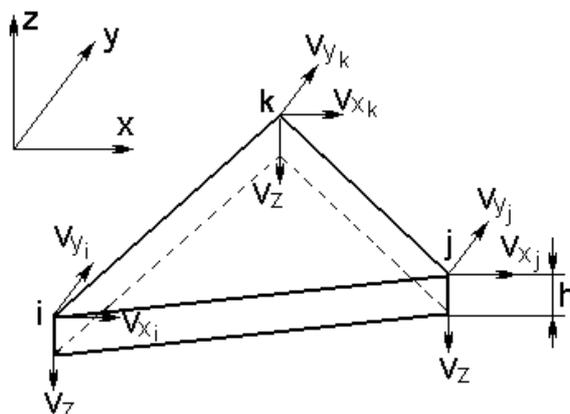


Рисунок 2 – Треугольный призматический конечный элемент

Интенсивность скоростей деформаций в конечном элементе определяется соотношением

$$\xi_u = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2 + \frac{1}{2} \eta_{xy}^2 \right)}, \quad (3)$$

условие несжимаемости - соотношением

$$\xi_x + \xi_y + \xi_z = 0. \quad (4)$$

При нестационарном пластическом течении решаем задачу пошаговым способом. Задаем изменение толщины заготовки (элемента) на каждом шаге  $\Delta h$  (в расчетах принимается  $\Delta h = 1 \dots 1,5\%$  от  $h_0$ ). Тогда текущее значение высоты элемента

$$h^i = h^{i-1} - \Delta h, \quad (5)$$

где  $h^i$  и  $\Delta h$  – соответственно высота элемента и заданное изменение высоты на текущем шаге деформирования,

$h^{i-1}$  – высота элемента на предыдущем шаге деформирования. Задав промежуток времени  $\Delta t$ , за который толщина элемента изменяется на  $\Delta h$ , определим скорость деформации  $\xi_z$  на  $i$ -м шаге деформирования

$$\xi_z^i = \dot{h}/h^i, \quad (6)$$

где  $\dot{h} = \Delta h/\Delta t$ .

Мощность сил трения  $W_{TP}$  на контактной с инструментом поверхности, описанной треугольником  $ijk$ , определяется с помощью выражения

$$W_{TP} = \int_{S_{(ijk)}} \tau_{k_i} |V_{s_i}| dS, \quad (7)$$

где  $\tau_{k_i}$  – компоненты напряжения трения в плоскости  $xu$ ,

$|VS|$  – модуль вектора скорости относительного скольжения инструмента и заготовки на поверхности их контакта. Поскольку компоненты скоростей перемещений инструмента в плоскости скольжения равны нулю, то учитывается только скорость перемещения материала, которая представляется через узловые значения скоростей в плоскости  $xu$  в матричном виде. После дифференцирования выражения (7) по компонентам вектора узловых скоростей получим вектор-столбец результирующих величин для КЭ, который должен быть включен в правую часть системы конечноэлементных алгебраических уравнений при выполнении процедуры ансамблирования:

$$\frac{\partial W_{TP}}{\partial \{v\}} = \frac{\partial}{\partial \{v\}} \int_{S_{(ijk)}} \{\tau_k\}^T [N] \{v\} dS = \int_{S_{(ijk)}} [N]^T \{\tau_k\} dS = \frac{S_{(ijk)}}{3} \begin{Bmatrix} \tau_{k_x} \\ \tau_{k_y} \\ \tau_{k_x} \\ \tau_{k_y} \\ \tau_{k_x} \\ \tau_{k_y} \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Приняв, что в каждой точке на поверхности контакта направление  $\vec{\tau}_k$  совпадает с направлением  $\vec{v}$  (без учета знака), найдем величины компонентов  $\tau_k$  по зависимостям

$$\tau_{k_x} = \tau_k \cos \alpha; \quad \tau_{k_y} = \tau_k \sin \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол между  $\vec{v}$  и осью  $x$ .

Напряженное состояние находим по известному деформированному с помощью ассоциированного закона течения

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\xi_u} \xi_x + \sigma; \quad \sigma_y = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\xi_u} \xi_y + \sigma; \quad \sigma_z = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\xi_u} \xi_z + \sigma; \quad \tau_{xy} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_u}{\xi_u} \eta_{xy} \quad (10)$$

Принимаем, что в конечном элементе среднее напряжение есть функция в плоскости  $xu$ , то есть  $\sigma = \sigma(x,y)$  и постоянно по толщине элемента  $\sigma = const$ .

С учетом принятых ранее допущений, а также принимая во внимание выражение (1), систему уравнений равновесия для конечного элемента запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{2mk}{h} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{2mk}{h} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для вычисления среднего напряжения в пределах КЭ применим схему расчета, приведенную в работе [1].

Тогда получим выражение для расчета величины среднего напряжения  $\sigma$  в точке  $b$  по известному значению этой величины в точке  $a$ , в следующем виде

$$\sigma_b = \sigma_a + \int_a^b \left[ \left( -\frac{\partial s_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{2mk}{h} \right) dx + \left( -\frac{\partial s_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{2mk}{h} \right) dy \right]. \quad (12)$$

Для начала вычислений распределения величины  $\sigma$  требуется знать его значение в какой-либо одной точке. Это значение можно получить, например, из условия, что на свободной от нагрузки поверхности заготовки нормальное к этой поверхности напряжение равно нулю.

Для расчета деформированного состояния тонкослойных заготовок используется система конечноэлементных уравнений, которая получена путем модернизации соответствующих выражений, разработанных ранее для решения плоских задач [3]. Отличие ее от ранее полученных систем уравнений заключается в том, что в соответствующие соотношения в виде параметра введена компонента тензора скоростей деформаций в направлении толщины осаживаемого слоя  $\xi_z$ , которая на каждом шаге решения задачи определяется на основании заданного режима деформирования (скорости движения рабочего органа). Поиск минимизирующего поля скоростей в классе функций, отвечающих условию несжимаемости с учетом параметра  $\xi_z$ , позволяет в процессе деформации сохранить постоянство объема всего призматического конечного элемента.

*Данная работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ № 10-08-97527-р\_центр\_а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухарь, В.Д. Расчет напряженного состояния при конечно-элементном анализе процессов пластического формоизменения / В.Д. Кухарь, Е.М. Селедкин, А.Е. Киреева // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Вып. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 60-64.
2. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
3. Исследование плоского пластического течения ортотропного материала методом конечных элементов / С.П. Яковлев и др.; Тул. гос. ун-т - Тула, 1987. - 38 с. - Деп. в ВИНТИ 26.02.87, № 1442-В87.

**Кухарь Владимир Денисович**

Тулский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая механика», проректор по научной работе

Тел. (4872)35-82-00

E-mail: Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru

**Селедкин Сергей Евгеньевич**

Тулский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук

Тел. (4872)35-18-32

E-mail: tm@tsu.tula.ru

**Киреева Алена Евгеньевна**

Тулский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика»

Тел. (4872)35-18-32,

E-mail: kirealena@yandex.ru

V.D.KUHAR, S.E.SELEDKIN, A.E.KIRIEVA

## MATHEMATICAL MODELING OF LIGHT WORKPIECE PRECIPITATION

*In given article, calculation of the is intense-deformed condition is resulted at a deposit монколистовых preparations on the basis of a method of final elements.*

**Keywords:** *processing of metals by the pressure, the is intense-deformed condition, mathematical modeling, a method of final elements, pressure.*

1. Kuhar', V.D. Raschet naprjazhennogo sostojanija pri konechno-jelementnom analize processov plasticheskogo formoizmenenija / V.D. Kuhar', E.M. Seledkin, A.E. Kireeva // Izvestija TulGU. Serija Tehniceskie nau-ki. – Vyp. 4. – Tula: Izd-vo TulGU, 2010. – S. 60-64.
2. Segerlind, L. Primenenie metoda konechnyh jelementov / L. Segerlind. – M.: Mir, 1979. – 392 s.
3. Issledovanie ploskogo plasticheskogo techenija ortotropnogo materiala metodom konechnyh jelemen-tov / S.P. Jakovlev i dr.; Tul. gos. un-t - Tula, 1987. - 38 s. - Dep. v VINITI 26.02.87, № 1442-V87.

### **Kuhar Vladimir Denisovich**

Tula state university, Tula

Doctor of technical science, professor, head of department “Theoretical mechanics”, pro-rector for scientific work

Tel. 4872-35-82-00

E-mail: Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru

### **Seledkin Sergey Yevgenievich**

Tula state university, Tula

Candidate of technical science

Tel. 4872-35-18-32

E-mail: tm@tsu.tula.ru

### **Kireeva Alena Yevgenievna**

Tula state university, Tula

Candidate of technical science, associate professor of department “Theoretical mechanics”

Tel. 4872-35-18-32

E-mail: kirealena@yandex.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЗУБА ПРЯМОЗУБОГО КОНИЧЕСКОГО КОЛЕСА ЗУБОСТРОГАЛЬНЫМИ РЕЗЦАМИ

*В статье разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать профиль конического зубчатого колеса при зубострогании. Математическая модель дает возможность теоретически рассчитать площади и толщины срезаемых слоев по всей длине кромки в любой момент времени.*

**Ключевые слова:** зубострогание, коническое зубчатое колесо, математическая модель.

В современном машиностроении широко применяются прямозубые конические зубчатые передачи. Их применяют для передачи постоянных нагрузок при окружной скорости до 5м/с. Данный тип зубчатых передач нашел широкое применение в автомобилестроении, станкостроении и других отраслях машиностроения.

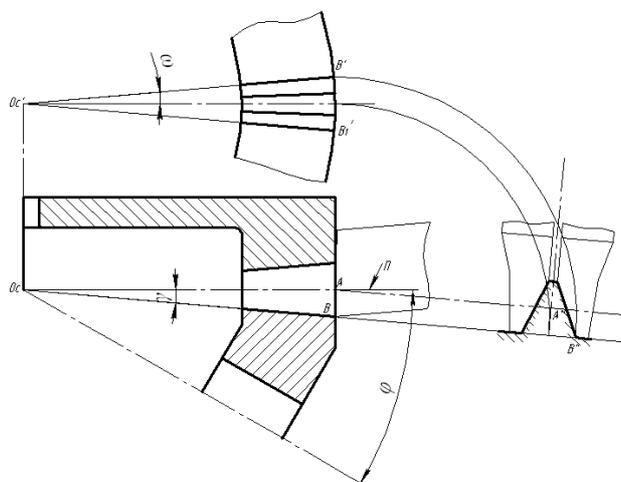
Одним из самых распространенных способов нарезания конических зубчатых колес в мелкосерийном и серийном производстве является зубострогание двумя резцами с прямолинейными режущими кромками.

Изучением данного вида обработки занимались В.Н. Кедринский, К.М. Писманик [1], С.Н. Калашников, А.С. Калашников [2] и др. Однако вопрос влияния изменения составляющих сил резания на точность и качество получаемого профиля зубчатого колеса остается открытым. Кроме того, не было установлено влияние динамических характеристик процесса зубострогания на точность и качество получаемого конического зубчатого колеса.

Увеличение точности зубчатого венца приводит к значительному снижению трения в зубчатой паре, к повышению плавности работы, снижению износа и увеличению срока службы зубчатой передачи. Поэтому актуальным в современном машиностроении становится задача повышения эксплуатационных характеристик на основе прогнозирования точности и качества поверхности.

Целью работы является создание математической модели отображения схемы резания, что позволит в дальнейшем рассчитать траекторию движения любой точки режущей кромки в пространстве и, следовательно, определить толщины и площади срезаемых слоев, силы резания, спрогнозировать точностные и качественные параметры нарезаемого зубчатого венца, а также определить оптимальные режимы резания.

Для создания математической модели, воспользуемся схемой нарезания прямозубых зубчатых конических колес двумя резцами (рис. 1).



**Рисунок 1 – Нарезание конического зубчатого колеса по схеме плоского производящего колеса**

$\alpha_c$  – угол ножки зуба;  $\alpha$  – угол установки поворотных сегментов люльки;

$\phi$  – угол начального конуса обрабатываемого колеса

В общем виде математическое отображение схемы резания в декартовых координатах можно представить следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} X &= f(l, s, \Delta h); \\ Y &= f(l, s, \Delta h); \\ Z &= f(l, s, \Delta h). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты точки режущих лезвий инструмента в процессе резания;

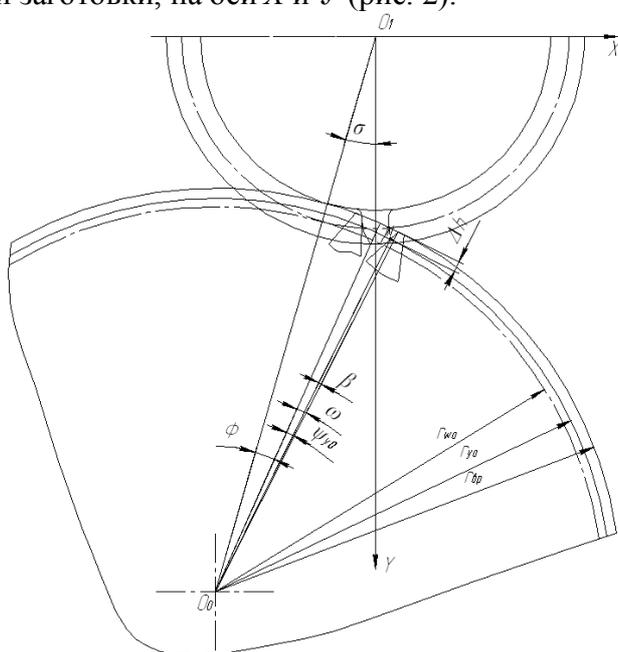
$l$  – параметр движения резания;

$s$  – параметр подачи;

$\Delta h$  – параметр режущей кромки.

Параметр  $\Delta h$  представляет собой задаваемый отрезок, лежащий на векторе, соединяющем вершину резца и центр производящего колеса.

Для получения уравнения траектории перемещения точки при обработке зубчатых колес, спроектируем отрезок  $O_0O_1$  являющийся межосевым расстоянием производящей окружности и обрабатываемой заготовки, на оси  $X$  и  $Y$  (рис. 2).



**Рисунок 2 – Схема определения положения режущих кромок резцов относительно зуба колеса**

$$\begin{aligned} X &= a_{w0} \sin \sigma; \\ Y &= a_{w0} \cos \sigma; \\ Z &= l \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma$  – угол, определяющий положения центра производящей окружности относительно заготовки;

$\varphi$  – угол начального конуса;

$a_{w0}$  – межосевое расстояние.

Взаимосвязь угла  $\sigma$  и угла положения строгального резца относительно межосевого расстояния –  $\Phi$ , выразим соотношением:

$$\sigma = \frac{r_{w0}}{r_{w1}} \Phi; \quad (3)$$

где  $r_{w0}, r_{w1}$  – радиусы начальных окружностей производящего колеса и заготовки;

Обозначим  $\frac{r_{w0}}{r_{w1}}$  через  $U_0$ , подставим его в выражение (3), затем выражение (3) в выражение (2):

$$\begin{aligned} X &= a_{w0} \sin(U_0 \Phi); \\ Y &= a_{w0} \cos(U_0 \Phi); \\ Z &= l \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение траектории перемещения любой точки режущего лезвия резца относительно обрабатываемой детали получим, проецируя отрезки  $O_0O_1$  и  $O_0N$  на координатные оси (рис. 2):

$$\begin{aligned} X &= a_{w0} \sin[U_0(\Phi + \Delta\Phi)] - r_{y0} \sin[(1 + U_0)(\Phi + \Delta\Phi) \pm \psi_{y0}] \\ Y &= a_{w0} \cos[U_0(\Phi + \Delta\Phi)] - r_{y0} \cos[(1 + U_0)(\Phi + \Delta\Phi) \pm \psi_{y0}] \\ Z &= l \cos \varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

где знак «+» – относится к первому резцу;

знак «-» – относится ко второму резцу;

$\Delta\Phi$  – элементарный угол поворота за время двойного хода резца:

$$\Delta\Phi = \frac{S_{KP}}{r_{w0}} \left( 1 + \frac{l \cos \varphi}{2L} \right); \quad (6)$$

где  $r_{w0}$  – радиус делительной окружности производящей производящего колеса;

$S_{KP}$  – окружная подача;

$L$  – длина хода резцедержателя;

$r_{y0}$  – радиус – вектор точки на режущем лезвии резца;

$$r_{y0} = r_{ep} - \Delta h, \quad (7)$$

где  $r_{ep}$  – радиус вершины резца.

$\psi_{y0}$  – угол между линией симметрии установки резцов и линией соединяющей вершину режущей кромки резца и точку  $O_0$ :

$$\psi_{y0} = \omega - \beta; \quad (8)$$

где  $\omega$  – угол установки поворотных сегментов люльки,

$\beta$  – угол между отрезком  $O_0N$  и линией соединяющей вершину режущей кромки резца и точку  $O_0$ .

$$\beta = \arcsin \left[ \operatorname{tg} \alpha \cos \nu \frac{\Delta h}{r_{y0}} \right]; \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол зацепления.

Подставим (6), (7), (8), (9) в выражение (5), получим координаты точки режущего лезвия в любой момент времени:

$$\begin{aligned} X &= a_{w0} \sin \left[ U_0 \left( \Phi + \frac{S_{KP}}{r_{w0}} \left( 1 + \frac{l \cos \varphi}{2L} \right) \right) \right] - \\ &- (r_{ep} - \Delta h) \sin \left[ (1 + U_0) \left( \Phi + \frac{S_{KP}}{r_{w0}} \left( 1 + \frac{l \cos \varphi}{2L} \right) \right) \pm \left( \omega - \arcsin \left\{ \operatorname{tg} \alpha \cos \nu \frac{\Delta h}{r_{ep} - \Delta h} \right\} \right) \right]; \\ Y &= a_{w0} \cos \left[ U_0 \left( \Phi + \frac{S_{KP}}{r_{w0}} \left( 1 + \frac{l \cos \varphi}{2L} \right) \right) \right] - \\ &- (r_{ep} - \Delta h) \cos \left[ (1 + U_0) \left( \Phi + \frac{S_{KP}}{r_{w0}} \left( 1 + \frac{l \cos \varphi}{2L} \right) \right) \pm \left( \omega - \arcsin \left\{ \operatorname{tg} \alpha \cos \nu \frac{\Delta h}{r_{ep} - \Delta h} \right\} \right) \right]; \\ Z &= l \cos \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Варьируя параметр  $\Delta$ , мы можем получить координаты точек лежащих на режущих кромках строгальных резцов (рис. 3). Это позволит нам непосредственно определить точки на резцах, которые формируют поверхность зуба.

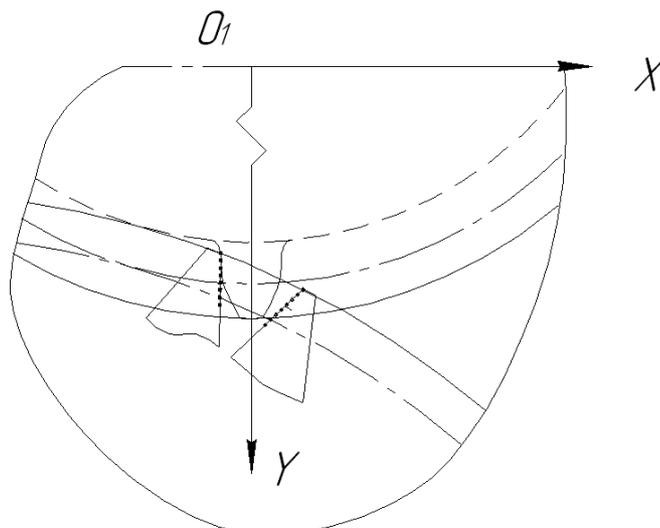


Рисунок 3 – Определение координат точек лежащих на режущих кромках лезвия резцов

Таким образом, пользуясь представленной моделью, мы можем определить профиль зуба зубчатого колеса (рис. 4).

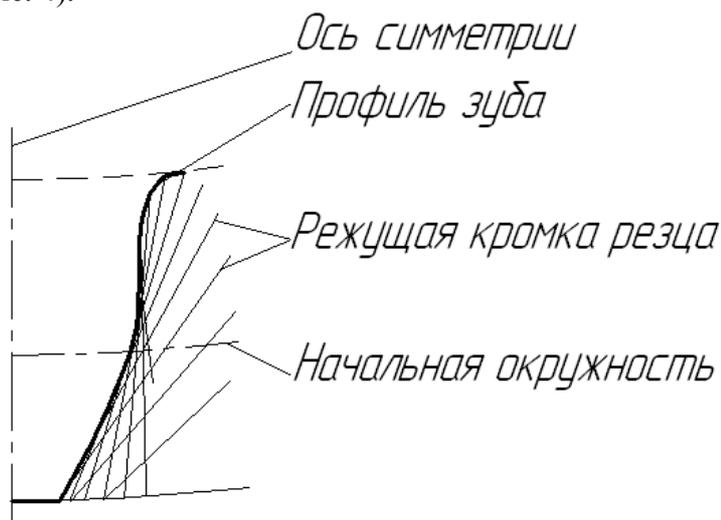


Рисунок 4 – Формирования профиля зуба колеса

В данной работе было получено математическое отображение пространственной схемы зубострогания двумя резцами. Пользуясь этой моделью можно определить толщины и площади срезаемых слоев металла, силы резания, возникающие в процессе строгания, динамические характеристики в любой момент времени.

Использование данной модели позволит не только прогнозировать точность и качество поверхности, но и управлять процессом зубострогания двумя резцами, с целью достижения заданных точностных параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кедринский, В.Н. Станки для обработки конических зубчатых колес. [Текст] / В.Н. Кедринский, К.М. Писманик. – М.: Машиностроение, 1967. – 588с.: ил.
2. Калашников, С.Н. Зубчатые колеса и их изготовление. [Текст] / С.Н. Калашников. – М.: Машиностроение, 1983. – 269 с.
3. Харламов, Г.А. Теория проектирования процессов лезвийной обработки. [Текст] / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М: Машиностроение, 2003. – 252с.: ил.

4. Полохин, О.В. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 152 с.

**Дерли Александр Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УПНК», г. Орел, Россия

к.т.н., доцент

телефон: (4862)550802;

E-mail: upk@ostu.com

**Канатников Никита Владимирович**

студент пятого курса направления 150401 «Проектирование технических и технологических комплексов

телефон: (4862)550802;

E-mail: upk@ostu.com

A.N. DERLI, N.V.KANATNIKOV

**MATHEMATICAL MODEL OF SCHEME FORMATION A PROFILE  
OF A CONIC WHEEL BY GEAR SHAPING CUTTERS**

*The simulator allows to predict the profile of bevel gearwheel during the gear shaping. The simulator makes it possible to calculate theoretically the area and thickness of layers cut throughout the length of the edge at any time.*

**Keywords:** gear shaping, a conic cogwheel, mathematical model.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kedrinskij, V.N. Stanki dlja obrabotki konicheskikh zubchatyh koles. [Tekst] / V.N. Kedrinskij, K.M. Pismanik. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 588s.: il.
2. Kalashnikov, S.N. Zubchatye koleasa i ih izgotovlenie. [Tekst] / S.N. Kalashnikov. – M.: Mashino-stroenie, 1983. – 269 s.
3. Harlamov, G.A. Teorija proektirovanija processov lezviynoj obrabotki. [Tekst] / G.A. Harlamov, A.S. Tarapanov. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 252s.: il.
4. Polohin, O.V. Issledovanie i proektirovanie processov zubonarezanija instrumentami chervjachnogo tipa [Tekst] / O.V. Polohin, A.S. Tarapanov, G.A. Harlamov. – M.: Mashinostroenie-1, 2006. – 152 s.

**Derli Aleksandr Nikolaevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor

Tel. 4862-550802

E-mail: upk@ostu.ru

**Kanatnikov Nikita Vladimirovich**

Fifth year student at 150401 “Design of technical and technological complexes”

Tel: 4862-550802

E-mail: upk@ostu.ru

А.А. МАЛИКОВ, С.А. АСТАХОВ

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК МНОГОРЕЗЦОВЫМИ ГОЛОВКАМИ

*В статье анализируются причины возникновения вибраций при точении тонкостенных труб многорезцовыми головками. Разработанная модель может быть применима для численного моделирования при оценке критерия устойчивости процесса точения. Математический аппарат пригоден для качественной оценки виброустойчивости технологической системы и количественной оценки влияния упругих колебаний на динамические характеристики процесса многорезцового точения.*

**Ключевые слова:** точение, тонкостенные трубы, многорезцовые головки, виброустойчивость.

Одной из классических операций по обработке деталей типа тонкостенных труб является токарная обработка. Чтобы снизить погрешность, вызванную прогибом заготовки при обработке, применяют точение многорезцовыми головками. Этот процесс также не лишен проблем. Одна из них – вибрации, возникающие вследствие непостоянства силы резания. Чтобы оценить, насколько данный способ приемлем для обработки, то есть, будут ли возникающие динамические погрешности формы находиться в зоне допуска, целесообразно использовать имитационное моделирование.

В нашем случае имитационная модель будет состоять из трех компонентов:

- 1) динамическая модель упругих колебаний технологической системы;
- 2) модель силы резания, учитывающая изменения режимов резания во времени;
- 3) критерий виброустойчивости технологической системы.

Само моделирование описывает итерационный дискретный по времени процесс обработки, включающий перечисленные компоненты. На рисунке 1 представлены концептуальная схема имитационной модели и взаимосвязи ее компонентов.



Рисунок 1 – Этапы моделирования виброустойчивости точения многорезцовыми головками

На каждом шаге рассчитываются текущие значения функций колебаний заготовки в зоне резания; погрешности режимов резания; и, наконец, динамические изменения силы резания, учитывающие вышеперечисленные параметры. При этом на каждой итерации необходимо проверять критерий устойчивости технологической системы: если система устойчива, то процесс продолжается, в противном случае – моделирование прекращается, запоминается и фиксируется момент времени и текущая координата зоны резания. В случае устойчивости процесса результатом моделирования являются текущие режимы резания и, как следствие, изменения формы детали относительно номинальной.

Рассмотрим подробнее компоненты динамической модели виброустойчивости при многолезцовом точении тонкостенных труб. Ранее в работах [1,2] рассматривался структурный критерий устойчивости, который позволяет качественно ответить на вопрос о наличии вибраций в технологической системе. Но в конкретных случаях учитывались только поперечные колебания заготовки, при этом заготовка рассматривалась как точка с приведенной массой и жесткостью в вертикальной плоскости координат станка.

Чтобы учесть все упругие колебания: продольно-крутильные и поперечные, - необходимо выполнить имитационное моделирование процесса обработки резанием, для чего необходимо выполнить линеаризацию динамических составляющих силы резания от самих величин погрешностей или их производных по времени. При этом устойчивость будет определяться для данной координаты зоны резания по длине заготовки.

После того, как будет известно, что процесс устойчив по всей длине обрабатываемого участка, можно подбирать режимы резания.

Для решения поставленной задачи следует описать процесс с помощью системы линейных дифференциальных уравнений (1) относительно упругих перемещений: продольных -  $w$ , крутильных -  $\varphi$ , поперечных вдоль оси  $Oy$  -  $u_y$  и вдоль оси  $Oz$  -  $u_z$ .

$$\begin{cases} m_x \cdot \ddot{w} + \eta_x \cdot \dot{w} + C_x \cdot w = \Delta P_x; \\ m_y \cdot \ddot{u}_y + \eta_y \cdot \dot{u}_y + C_y \cdot u_y = \Delta P_y; \\ m_z \cdot \ddot{u}_z + \eta_z \cdot \dot{u}_z + C_z \cdot u_z = \Delta P_z; \\ I_\varphi \cdot \ddot{\varphi} + \eta_\varphi \cdot \dot{\varphi} + C_\varphi \cdot \varphi = R \cdot \Delta P_z. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_\varphi$  - коэффициенты затухания;  $C_x, C_y, C_z, C_\varphi$  - приведенные коэффициенты жесткости технологической системы в зоне резания;  $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$  - составляющие динамических изменений сил резания по осям координат относительно технологической системы;  $m_x, m_y, m_z$  - приведенные массы технологической системы по осям координат:

$$m_x = \frac{C_x}{\omega^2}; m_y = \frac{C_y}{\omega^2}; m_z = \frac{C_z}{\omega^2},$$

где  $\omega$  – собственная частота технологической системы;

$I_\varphi$  – момент инерции;

$R$  – радиус заготовки.

К полученной математической модели процесса нельзя применить критерий Гаусса-Гурвица в явном виде, так как формулы расчета изменений силы резания имеют степенную зависимость от режимов резания, а также от текущих значений колебаний в зоне резания. Для устранения проблемы степенной зависимости можно применить разложение в ряд Тейлора [3]. При этом следует помнить о временной зависимости погрешностей режимов резания от значения функций продольных, поперечных и крутильных колебаний.

Тангенциальная составляющая силы резания  $\vec{P}_{\tau_i}$  при многолезцовом точении будет направлена по касательной к поверхности резания (рис. 2).

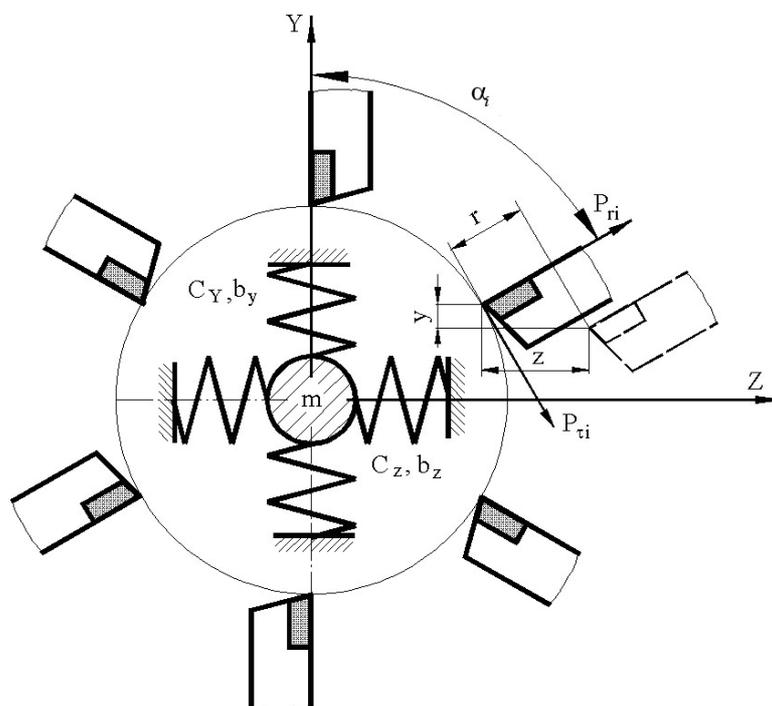


Рисунок 2 – Технологические факторы, действующие при точении многорезцовыми головками

Индекс  $i$  зависит от номера инструмента:  $i = 1, \dots, n$ . Здесь  $n$  - количество резцов. Две остальных составляющих силы – радиальная  $\vec{P}_{R_i}$  и осевая  $\vec{P}_{x_i}$  будут пересчитываться через линейный коэффициент [4]:

$$P_{\tau_i} = C_p \cdot (t_0 - \Delta t_i)^m \cdot (s_0 - \Delta s_i)^p \cdot (v_0 - \Delta v_i)^n \cdot K, \quad (2)$$

$$P_{R_i} = k_R \cdot P_{\tau_i}, \quad (3)$$

$$P_{x_i} = k_x \cdot P_{\tau_i}. \quad (4)$$

где  $C_p$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

$t_0$  – глубина резания;

$s_0$  – подача;

$v_0$  – скорость резания;

$m, p, n$  – табулированные показатели степени;

$K$  – общий поправочный коэффициент, учитывающий изменение условий резания по отношению к табличным;

$k_x, k_y$  – линейные табулированные коэффициенты;

$\Delta t_i, \Delta s_i, \Delta v_i$  – динамические изменения соответствующих режимов резания (глубины, подачи и скорости).

Для упрощения зависимости воспользуемся разложением в степенной ряд. Для этого требуется выдержать два условия:

1) ряд должен быть сходящимся;

2) число членов ряда должно аппроксимировать эмпирическую зависимость с некоторой заранее заданной точностью.

Начнем с разложения в ряд всех степенных множителей зависимостей (2)-(4). При этом за переменную величину примем динамическое изменение соответствующего параметра резания –  $\Delta t_i, \Delta s_i, \Delta v_i$ . Тогда используя разложение Тейлора [3] первого порядка, получим следующий вид для степенных множителей:

$$\begin{cases} (t_0 - \Delta t_i)^m \approx t_0^m - t_0^{m-1} \cdot m \cdot \Delta t_i; \\ (s_0 - \Delta s_i)^p \approx s_0^p - s_0^{p-1} \cdot p \cdot \Delta s_i; \\ (v_0 - \Delta v_i)^n \approx v_0^n - v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом зависимостей (5) формула расчета тангенциальной составляющей силы резания примет вид:

$$P_{\tau_i} \approx C_p \cdot t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^n - C_p \cdot (t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot \Delta t_i + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot \Delta s_i + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i) = P_{\tau_{i0}} + \Delta P_{\tau_i}. \quad (6)$$

При имитационном моделировании процесса точения используются динамические составляющие сил резания. Их расчет будет происходить по следующим формулам:

$$\Delta P_{\tau_i} = -C_p \cdot (t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot \Delta t_i + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot \Delta s_i + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i); \quad (7)$$

$$\Delta P_{x_i} = k_x \cdot \Delta P_{\tau_i}; \quad (8)$$

$$\Delta P_{R_i} = k_R \cdot \Delta P_{\tau_i}. \quad (9)$$

Для имитационного моделирования необходимо разложение динамических составляющих силы резания по осям координат. Если осевую составляющую можно рассчитать по формуле (8), то составляющие в плоскости резания будут пересчитываться в зависимости от угла поворота резца и от их суммы.

В систему (1) будем подставлять суммарные динамические составляющие сил резания:

$$\Delta P_z = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\tau_i} \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$\Delta P_y = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\tau_i} \cdot (k_R \cdot \sin \alpha_i - \cos \alpha_i).$$

При этом надо учесть, что для структурного критерия требуется разложение силы резания через упругие колебания, поэтому получим формулы расчета погрешностей:

$$\Delta t_i = u_z \cdot \cos(\alpha_i) - u_y \cdot \sin(\alpha_i) + e_i, \quad (10)$$

$$\Delta s_i = w - \phi \cdot R, \quad (11)$$

$$\Delta v_i = \dot{u}_z \cdot \sin(\alpha_i) + R \cdot \dot{\phi} \cdot \cos(\alpha_i). \quad (12)$$

Здесь  $e_i$  – суммарная погрешность формы заготовки, зависящая от угла поворота и координаты зоны резания.

С учетом расчетных формул (10) – (12) перепишем зависимость (7) следующим образом:

$$\Delta P_{\tau_i} = -C_p \cdot (t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot (u_z \cdot \cos \alpha_i - u_y \cdot \sin(\alpha_i) + e_i) + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot (w - \phi \cdot R) + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot (\dot{u}_z \cdot \sin(\alpha_i) + R \cdot \dot{\phi} \cdot \cos(\alpha_i))).$$

В общем случае динамические составляющие силы резания можно представить в виде:

$$\begin{cases} \Delta P_z = a_{xz} \cdot w + a_{yz} \cdot u_y + a_{zz} \cdot u_z + a_{\phi z} \cdot \phi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\phi z} \cdot \dot{\phi}; \\ \Delta P_y = a_{xy} \cdot w + a_{yy} \cdot u_y + a_{zy} \cdot u_z + a_{\phi y} \cdot \phi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\phi z} \cdot \dot{\phi}; \\ \Delta P_x = a_{xx} \cdot w + a_{yx} \cdot u_y + a_{zx} \cdot u_z + a_{\phi x} \cdot \phi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\phi z} \cdot \dot{\phi}. \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициенты линейного разложения в формулах (13) будут рассчитываться для каждого частного случая. Для тангенциальной составляющей  $\Delta P_z$  -

$$\begin{aligned}
 a_{yz} &= C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^p \cdot t_0^{m-1} \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i); \\
 a_{xz} &= -C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^{p-1} \cdot t_0^m \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i); \\
 a_{zz} &= -C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^p \cdot t_0^{m-1} \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i); \\
 a_{\varphi z} &= C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^{p-1} \cdot t_0^m \cdot m \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i); \\
 a'_{zz} &= -C_p \cdot v_0^{n-1} \cdot s_0^p \cdot t_0^m \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i); \\
 a'_{\varphi z} &= -C_p \cdot R \cdot v_0^{n-1} \cdot s_0^p \cdot t_0^m \cdot n \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i).
 \end{aligned}$$

Аналогично определяются коэффициенты для этого процесса при расчете радиальной  $\Delta P_y$  и осевой  $\Delta P_x$  динамических составляющих. Решение системы (1) будем искать в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 w &= A_x \cdot e^{s\tau}; \\
 u_y &= A_y \cdot e^{s\tau}; \\
 u_z &= A_z \cdot e^{s\tau}; \\
 \varphi &= A_\varphi \cdot e^{s\tau}.
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставляя выражения (13) и (14) в систему (1), получим

$$\left\{ \begin{aligned}
 &A_x(m_x \cdot s^2 + \eta_x \cdot s + C_x - a_{xx}) - A_y \cdot a_{yx} - A_z \cdot (a_{zx} + a'_{zx} \cdot s) - \\
 &- A_\varphi \cdot (a_{\varphi x} + a'_{\varphi x} \cdot s) = 0; \\
 &- A_x \cdot a_{xy} + A_y(m_y \cdot s^2 + \eta_y \cdot s + C_y - a_{yy}) - \\
 &- A_z \cdot (a_{zy} + a'_{zy} \cdot s) - A_\varphi \cdot (a_{\varphi y} + a'_{\varphi y} \cdot s) = 0; \\
 &- A_x \cdot a_{xz} - A_y \cdot a_{yz} + A_z(m_z \cdot s^2 + \eta_z \cdot s + C_z - a_{zz} - a'_{zz} \cdot s) - \\
 &+ A_\varphi \cdot (a_{\varphi z} + a'_{\varphi z} \cdot s) = 0; \\
 &- A_x \cdot a_{xz} \cdot R - A_y \cdot a_{yz} \cdot R - A_z \cdot (a_{zz} + a'_{zz} \cdot s) \cdot R + \\
 &+ A_\varphi(I_\varphi \cdot s^2 + \eta_\varphi \cdot s + C_\varphi - R \cdot (a_{\varphi z} + a'_{\varphi z} \cdot s)) = 0.
 \end{aligned} \right.$$

Общее решение характеристического уравнения системы, как уравнения восьмой степени, является сложным и неудобным для практического использования, поскольку результат невозможно получить в явной форме. Для того чтобы ответить на основной вопрос о том, при каких условиях (то есть при каких значениях исходных параметров) возникают автоколебания, не обязательно знать полное решение характеристического уравнения [3]. Достаточно составить из их коэффициентов условия устойчивости (критерий Гаусса - Гурвица), которые указывают, в каком случае характеристическое уравнение имеет корень с положительной вещественной частью или не имеет его. Если написать характеристическое уравнение в общем виде

$$A_0 \cdot s^8 + A_1 \cdot s^7 + A_2 \cdot s^6 + A_3 \cdot s^5 + A_4 \cdot s^4 + A_5 \cdot s^3 + A_6 \cdot s^2 + A_7 \cdot s + A_8 = 0, \quad (15)$$

то критерий устойчивости, то есть условия, при соблюдении которых ни один из корней уравнения не имеет вещественной положительной части, определяется системой неравенств:

$$I_j > 0, \quad j = 0, \dots, 8,$$

где  $I_j$  – инвариант  $j$ -го порядка уравнения (15):

$$I_0 = A_0; I_1 = A_1;$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} A_1 & A_0 \\ A_3 & A_2 \end{vmatrix}; I_3 = \begin{vmatrix} A_1 & A_0 & 0 \\ A_3 & A_2 & A_1 \\ A_5 & A_4 & A_3 \end{vmatrix}; I_4 = \begin{vmatrix} A_1 & A_0 & 0 & 0 \\ A_3 & A_2 & A_1 & A_0 \\ A_5 & A_4 & A_3 & A_2 \\ A_7 & A_6 & A_5 & A_4 \end{vmatrix};$$

.....и т. д. до 8 порядка:

$$I_8 = \begin{vmatrix} A_1 & A_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & A_2 & A_1 & A_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & A_0 & 0 & 0 \\ A_7 & A_6 & A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & A_0 \\ 0 & A_8 & A_7 & A_6 & A_5 & A_4 & A_3 & A_2 \\ 0 & 0 & 0 & A_8 & A_7 & A_6 & A_5 & A_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_8 & A_7 & A_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_8 \end{vmatrix}.$$

Имея математический аппарат для качественной оценки виброустойчивости технологической системы и количественной оценки влияния упругих колебаний на динамические характеристики процесса многолезцового точения, можно алгоритмизировать действия по выбору безвибрационных режимов, а затем определять оптимальные режимы резания, исходя из желаемой производительности и обеспечения заданного качества обработанной поверхности.

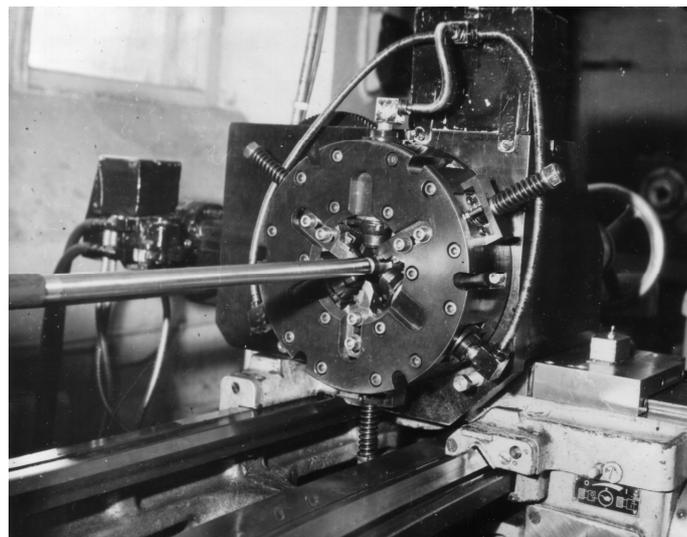


Рисунок 3 – Многолезцовая головка с подвижным виброгасящим люнетом для точения цилиндрических поверхностей

Проведенное нами моделирование показало, что при точении ствола охотничьего ружья трехлезцовыми головками при рациональных режимах резания невозможно добиться надежной виброустойчивости. Поэтому в данном случае мы прибегли к известному технологическому решению. Для увеличения параметров затухания  $\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_\phi$  и жесткости технологической системы вдоль осей  $Oy - C_y, Oz - C_z$ , применили трехлезцовую головку с тремя подпружиненными виброгасителями, размещенными в плоскости резания между резцами (см. рис. 3).

При быстрых микроперемещениях (вибрациях) их энергия поглощается за счет трения плунжера виброгасителя об упругие манжеты. Регулировкой преднатяга пружины люнета-виброгасителя можно повысить жесткость технологической системы в зоне обработки. Представленная на рисунке 3 многолезцовая головка с виброгасителями позволила полностью устранить вибрации для рассматриваемого процесса.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ямников, А.С. Точность обработки на металлорежущих станках: учеб. пособие / А.С. Ямников, И.А. Коганов, В.Н. Киселев. – Тула, Изд-во ТулГУ, 1996. – 132 с.
2. Кузнецов, В.П. Устойчивость технологической системы при нарезании резьбы многорезцовыми головками / В.П. Кузнецов, О.А. Ямникова // СТИН, М.: 2004, № 2, С. 12 – 14.
3. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1974. – 831 с.
4. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

**Маликов Андрей Андреевич,**

Тульский государственный университет, г. Тула,  
зав. кафедрой технологии машиностроения  
Тел/факс 8(4872) 33-23-10  
E-mail: tms@tsu.tula.ru

**Астахов Сергей Алексеевич**

Тульский государственный университет, г. Тула,  
главный инженер ТулГУ  
Тел. (4872) 33-24-70  
E-mail: tms@tsu.tula.ru

---

A.A. MALIKOV, S.A. ASTAKHOV

**ANALYTICAL DEFINITION OF CONDITIONS  
CHATTER STABILITIES AT TOЧЕНИИ THE THIN-WALLED  
CYLINDRICAL PREFORMS BLOCK-TYPE HEADS**

*In a article the reasons of origin of vibrations are analyzed at sharpen thin-walled tubes by block-type heads. The designed sample piece can be applicable for a numerical modelling at an estimation of a stability criterion of process sharpening. The Mathematical apparatus is suitable for quality standard of a chatter stability of technological system and a quantitative estimation of influence of elastic oscillations on dynamic characteristics of process block-type sharpen.*

**Keywords:** *sharpen, thin-walled tubes, block-type heads, a chatter stability.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Jamnikov, A.S. Tochnost' obrabotki na metallorezhuwih stankah: ucheb. posobie / A.S. Jamnikov, I.A. Koganov, V.N. Kiselev. – Tula, Izd-vo TulGU, 1996. – 132 s.
2. Kuznecov, V.P. Ustojchivost' tehnologicheskoy sistemy pri narezanii rez'by mnogorezcovymi go-lovkami / V.P. Kuznecov, O.A. Jamnikova // STIN, M.: 2004, № 2, S. 12 – 14.
3. Korn, G. Spravochnik po matematike (dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov) / G. Korn, T. Korn. - M.: Nauka, 1974. – 831 s.
4. Bobrov, V.F. Osnovy teorii rezanija metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 344 s.

**Malikov Andrey Andreevich**

Tula state university, Tula  
Head of department “Mechanical engineering technology”,  
Tel./fax 8-4872-33-23-01  
E-mail: tms@tsu.tula.ru

**Astahov Sergey Alekseevich**

Tula state university, Tula  
Senior engineer of TulSU  
Tel. 4872-33-24-70  
E-mail: tms@tsu.tula.ru

Ю.С. АНДРЕЕВ, В.А. ВАЛЕТОВ

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПИСАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*В работе рассмотрены и проанализированы математические модели, призванные обеспечить полное параметрическое описание профиля поверхности. Эти модели сравнены друг с другом и оценены на полноту описания профиля. Предложен метод оценки и контроля шероховатости поверхностей на основе использования непараметрических критериев.*

**Ключевые слова:** параметрическое описание профиля, математические модели, шероховатость поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации машин, приборов, аппаратов убедительно показывает, что их качество зависит от характера контактирования сопрягаемых поверхностей друг с другом или с другими средами, определяемого состоянием поверхностного слоя контактирующих деталей. [1] Отсюда следует, что эффективность эксплуатации изделий существенным образом зависит от качества изготовления входящих в их состав деталей, которые имеют функциональные поверхности, подвергаемые в процессе эксплуатации механическим, электрическим, трибологическим и другим видам воздействия. Свойства функциональных поверхностей, получаемых, как правило, посредством механической обработки, в значительной степени определяются структурой микронеровностей (шероховатостью) последних. Поэтому оптимизации микрогеометрии поверхностей уделяется в последнее время все большее внимание.

Традиционно отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии проводятся с использованием параметрического описания профиля. В частности, Ю. Г. Шнейдером была выявлена взаимосвязь эксплуатационных характеристик изделий, таких как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, с геометрическими параметрами их микро-рельефа – средним арифметическим отклонением профиля, средним шагом неровностей по вершинам, радиусом закругления неровностей и т.д.

Математическую модель параметрического описания профиля принято считать адекватной, если параметры профиля, воспроизведенного с помощью этой модели и аналогичные параметры реального профиля, полученные с помощью приемлемого измерительного прибора будут одинаковыми или будут отличаться на пренебрежимо малую величину.

В настоящее время наиболее часто используемый критерий  $R_a$  был бы достаточным для полного описания профиля, если бы можно было вычислить форму функции распределения ординат профиля, распределения выступов, средний наклон профиля, средний радиус заострения и т.д. Однако этого невозможно сделать.

Описание профиля одним критерием (набором критериев) следует считать полным, если из этого критерия (набора критериев) можно регенерировать только один профиль, по существу совпадающий с измеренным.

Известно, что полное параметрическое описание профиля или поверхности наиболее приемлемо для практики при случайных нормально распределенных их неровностях. Однако многие неровности реальных поверхностей нельзя считать чисто случайными, а последние не всегда являются нормально распределенными, поэтому использование математических моделей случайных нормально распределенных событий имеет определенные ограничения.

Наибольшие трудности для практического применения имеет полное параметрическое описание микрогеометрии поверхностей со значительной периодической составляющей, так как необходимо использовать большое количество различных параметров. Следует найти критерии, минимального количества которых было бы достаточно для полного описания микрогеометрии “сложных” поверхностей. При этом определение их должно быть сравнительно быстрым и легким даже в производственных условиях.

В нашей работе представлены и проанализированы три математические модели, следовательно, три набора критериев для оценки нормально распределенных случайных профилей. Эти модели сравнены друг с другом и оценены на полноту описания профиля.

Ограничение указанными профилями означает, что не все реальные поверхности могут быть описаны с помощью данных моделей, поэтому нами произведено уточнение границ, для которых этот подход допустим.

### **МОДЕЛЬ НАЯКА**

В 1971 г. Наяк (Nayak P.R.) [2] опубликовал статью, в которой впервые применил принципы случайных процессов для исследования технических поверхностей. Наяк рассматривал высоту  $z$  шероховатой поверхности как двумерную случайную переменную с независимыми переменными  $x$  и  $y$ . Он исследовал только изотропные, нормально распределенные поверхности и доказал, что они могут быть описаны с помощью трех базовых критериев:  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  – нулевого, второго и четвертого спектральных моментов, общее выражение которого имеет вид:

$$m_p = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) f^p df,$$

где  $G(f)$  – энергетический спектр профиля.

Зная базовые критерии, можно определить интересующие нас в конкретном случае характеристики профиля или поверхности. Например, формула для расчета плотности распределения выступов профиля имеет вид

$$D_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{m_4}{m_2} \right)^{1/2},$$

а для расчета плотности распределения выступов для поверхности

$$D_s = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \cdot \frac{m_4}{m_2}.$$

Таким образом,  $D_s \approx 1,2D_p$ , что вполне согласуется с реальностью.

Формулы, выведенные Наяком, показывают, что с помощью комплекса базовых критериев  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  можно определить все геометрические характеристики, которые могут влиять на ее функциональные свойства.

Рассмотрим некоторые способы определения спектральных моментов.

Расчет  $m_0$  прост:

$$m_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) df.$$

Интеграл от энергетического спектра – хорошо известная величина  $\sigma^2$ . Это значит, что

$$m_0 = \sigma^2 = R_q^2 \sim \frac{1}{L} \int_0^L z(x) dx,$$

где  $R_q$  – среднеквадратичное отклонение профиля;

$L$  – длина профиля;

$z(x)$  – профиль.

Моменты  $m_2$  и  $m_4$  можно вычислить несколькими методами. Например,

$$m_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) f^2 df, \quad m_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) f^4 df$$

Для определения этих моментов можно применить энергетический спектр кривой  $K(f) = f^2$  или  $K(f) = f^4$  и полученные произведения проинтегрировать. Чтобы избежать больших ошибок, в процессе интегрирования необходимо исключить все амплитуды, которые, например, менее чем в два раза превосходят амплитуду помех. Вторым источником ошибок при

интегрировании является недостаточное количество точек, описывающих интегрируемую кривую. В процессе исследования установлено, что минимально допустимое число точек равно 10. Это утверждение корректно для интегрирования с помощью правила трапеции непрерывно затухающего спектра, каким и является спектр профиля.

Один из методов определения спектральных моментов разработал Сайлес (Sayles R.S.) [3]. Он базируется на следующих математических соотношениях:

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= \sigma_z^2 = \beta(0) \\ m_2 &= \sigma_z^2 = -d^2 \beta(0)/dt^2 \\ m_4 &= \sigma_z^2 = -d^4 \beta(0)/dt^4 \end{aligned} \right\}.$$

Таким образом, спектральные моменты  $m_2$  и  $m_4$  соответствуют второй и четвертой производной автоковариационной функции. Используя простой метод дифференцирования, получаем:

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= (2/\Delta l^2) \cdot [\beta(D) - \beta(1)] = (2R_q^2/\Delta l)(1 - \rho_1) \\ m_4 &= (2/\Delta l^4) \cdot [3\beta(0) - 4\beta(1) + \beta(2)] = (2R_q^2/\Delta l^4)(3 - 4\rho_1 - \rho_2) \end{aligned} \right\},$$

где  $\Delta l$  – расстояние дискретизации;

$\rho_1, \rho_2$  – коэффициенты автокорреляционной функции.

Следовательно, моменты  $m_2$  и  $m_4$  можно вычислить с помощью  $R_q$  и первых трех значений автоковариационной функции. Это наиболее экономичный метод, не требующий больших затрат и нормального распределения профиля. Вычисленные значения зависят от расстояния дискретизации.

Простейший метод определения спектральных моментов базируется на следующих соотношениях:

$$\left. \begin{aligned} D_z &= 1/\pi \left( m_2/m_0 \right)^{1/2} \\ D_{ex} &= 1/\pi \left( m_4/m_0 \right)^{1/2} \end{aligned} \right\},$$

где  $D_z$  – плотность пересечений профилем нулевой линии;

$D_{ex}$  – плотность экстремумов профиля.

При этом

$$\left( D_{ex}/D_z \right)^{1/2} \approx \alpha.$$

Таким образом, при нормально распределенном случайном профиле спектральные моменты  $m_2$  и  $m_4$  можно определить путем простого подсчета переходов профиля через ноль и его экстремумов.

При наличии инструментальных помех число подсчитанных переходов через ноль и экстремумов увеличивается. Эту ошибку легко устранить, если применить соответствующий дискриминатор. Например, переход ноля засчитывать лишь тогда, когда сигнал после перехода через ноль превышает уровень ожидаемой амплитуды помех.

### **АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ**

Базовые критерии – спектральные моменты  $m_0, m_2, m_4$  – теснейшим образом связаны с коэффициентами автокорреляционной функции. Поэтому естественно стремление разработать модель, которая исходит из автокорреляционной функции. Такая модель была получена Вайтхаусом (Whitehouse D.J.) [4].

В качестве базовых критериев модели использованы коэффициенты автокорреляционной функции  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , а также среднеквадратичное отклонение  $R_q$ .

Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 1 - \rho_1 \\ A_2 &= 1 - \rho_2 \\ A_3 &= 3 - 4\rho_1 + \rho_2 \end{aligned} \right\}.$$

С учетом этих обозначений приведем ряд формул для описания некоторых производных критериев.

Таблица 1 – Производные критерии

Критерий	Выражение
Плотность перехода профилем нулевой линии	$D_z = \arctg \left\{ \left[ (1 - \rho_1^2) / \rho_1 \right]^{1/2} \right\} / \pi \Delta l$
Плотность заострения профиля	$D_p = 1 / \pi \arctg \left[ (A_3 / A_2)^{1/2} \right]$
Средняя высота заострений профиля	$H_p = \left[ R_q (A_1 / \pi)^{1/2} \right] / 2 D_p$
Рассеяние высоты заострения профиля	$\sigma_p = 1 + R_q^2 \left\{ \left[ (A_1 / 2\pi) (A_2 / A_3)^{1/2} \right] / D_p - (A_1 / 4\pi) / D_p^2 \right\}$
Средняя кривизна заострений профиля	$\beta_m = (R_q A_3) / \left[ 2 D_p \Delta l^2 (\pi A_1)^{1/2} \right]$
Рассеяние кривизны заострения профиля	$\sigma_\beta = \left\{ (R_q^2 A_3) / \left[ 4 \Delta l^4 \pi A_1 \right] \right\} \left[ 8 \pi A_1 + (2 / D_p) (A_1 A_2)^{1/2} - (1 / D_p^2) A_3 \right]$
Средний наклон выступов профиля	$Q = (R_q / \Delta l) (A_1 / \pi)^{1/2}$

Вайтхаус и Филипс вывели ряд формул, доказав правильность которых тем, что при  $\Delta l \rightarrow 0$  они переходят в раннее известные формулы для непрерывных сигналов. Чтобы обосновать корректность своих теоретических результатов, они выполнили экспериментальное исследование на реальных профилях. Критерии шероховатости рассчитали для 10 поверхностей, обработанных различными способами (путем шлифования, лазерной обработки и алмазного точения), с помощью трехточечной модели и общепринятых формул сравнили полученные результаты с вычисленными по выведенным ими уравнениям. Сходимость результатов составила более 85 %.

Автокорреляционная функция в значительной степени зависит от расстояния дискретизации. Чтобы исследовать зависимость базовых и производных критериев от этого расстояния проведено исследование с помощью теоретической автокорреляционной функции. Эта теоретическая функция выбрана так, чтобы путем изменения ее параметров можно было моделировать автокорреляционные функции профилей различного характера.

Исследование производили таким путем, что с помощью теоретической автокорреляционной функции создавалась определенного вида теоретическая поверхность, для которой вычисляли различные критерии микрогеометрии в зависимости от расстояния дискретизации. Типичные примеры представлены на рисунке 1. Кривые для чисто случайного теоретического профиля имеют в каждом случае постепенный переход от определенного граничного значения при малых  $\Delta l$  к другому граничному значению при больших  $\Delta l$ . Следовательно, малое изменение  $\Delta l$  не приводит к большим изменениям вычисляемых критериев.

Критерии, вычисленные для стохастического профиля, стабильны для изменения расстояния дискретизации, т.е. вычисленные для стохастических профилей критерии внутри определенной области расстояний дискретизации надежны и сравнимы друг с другом. Однако большие изменения расстояния дискретизации для стохастических профилей вызывают заметные изменения вычисленных критериев, и сравнение результатов становится невозможным.

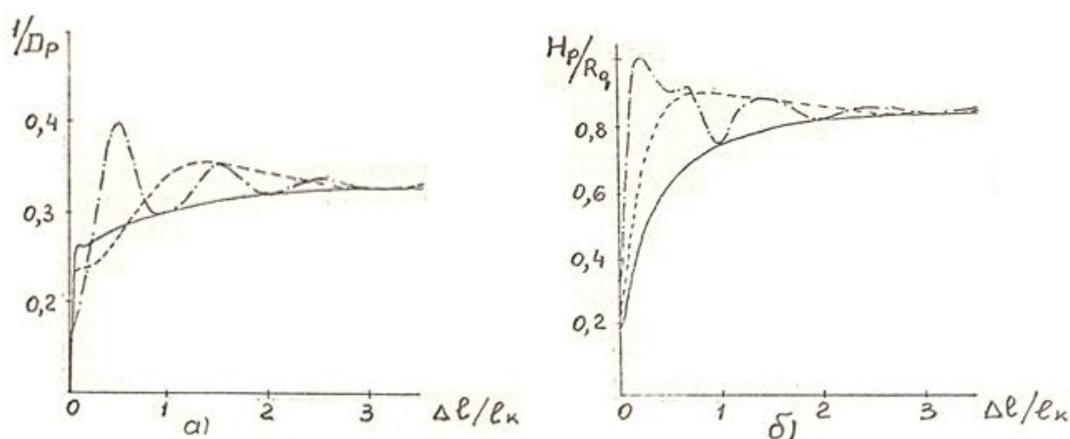


Рисунок 1 – Границы применимости автокорреляционной модели для оценки числа случайных (сплошные линии), с малой (штриховые) и большой (штрихпунктирные) периодичностью профилей [9]

Кривые для модулированных теоретических профилей свидетельствует о сильных колебаниях, которые становятся тем больше, чем больше периодическая часть сигнала. При значительной периодической части даже малые изменения  $\Delta l$  приводят к большим изменениям  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , а значит, и критериев, вычисленных по этим коэффициентам. Отсюда ясно, что с увеличением в профиле периодической части автокорреляционный метод становится менее надежным.

Интересны также свойства модели в частотной области. Вайтхаус и Филипс применяли  $R_q$  и автокорреляционные коэффициенты  $\rho_1$  и  $\rho_2$  для моделирования профиля. Из этих базовых критериев легко получаются первых три коэффициента автоковариационной функции:

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= R_q^2 \\ \beta_1 &= \rho_1 R_q^2 \\ \beta_2 &= \rho_2 R_q^2 \end{aligned} \right\}$$

Моделирования профиля с помощью  $R_q$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  в частотной области равнозначно моделированию с помощью спектра одной колеблющейся массы.

### УПРОЩЕННАЯ КЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Энергетический спектр профилей, получающийся при использовании предыдущих моделей, приближается к спектру одной колеблющейся массы. При этом необходимо применение не менее трех базовых критериев, что на практике связано с определенными трудностями.

Исследование большого количества профилей электроэродированных, тянутых, гидрореспектоструйных и шлифованных поверхностей показало, что не менее половины рассмотренных спектров затухает по экспоненте.

Вероятность того, что с помощью экспоненциальной функции спектр профиля описывается достаточно точно, по меньшей мере столь же велика, как вероятность того, что его описание с помощью спектра одной колеблющейся массы – лучше. Это позволяет использовать модель, для которой достаточно иметь два базовых критерия. Согласно этой модели форма спектра профиля описывается формулой

$$A(f) = R_q \sqrt{b} e^{-bf}$$

где  $b$  – постоянная затухания.

Однако вследствие трудности определения постоянной затухания  $b$  в качестве второго базового критерия (первый  $R_q$ ) можно использовать среднюю длину волны  $\lambda_m$ .

$$\lambda_m = 2\pi(m_0/m_1)^{1/2}. \tag{1}$$

Если иметь в виду, что плотность перехода профиля через ноль  $D_z = 1/\pi (m_2/m_0)^{1/2}$ , то становится ясным, почему целесообразнее использовать  $\lambda_m$  и определить ее по формуле (1). Очевидно, соотношение  $\lambda_m = 1/2 D_z$  достаточно точно для любой случайной поверхности.

Таким образом, для случайных профилей среднюю длину волны  $\lambda_m$  можно определить путем подсчета переходов профиля через ноль.

### ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАССМОТРЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Параметрическое описание профиля следует рассматривать как полное, если по этим параметрам можно рассчитать сигнал, обладающий теми же свойствами, что и измеренный. Чтобы проверить эффективность приведенных выше моделей, сделано следующее.

1. С обработанных различными методами поверхностей с помощью профилометра записаны профили. В эксперименте использовались только профили, близкие к нормально распределенным.

2. Непосредственно из профилей с помощью общепринятого метода трех точек вычислены различные критерии шероховатости.

3. С помощью соответствующей математической модели определены те же критерии, которые установлены непосредственно из профилей.

В качестве примера некоторые результаты приведены в таблице 2.

Значения критериев шероховатости, непосредственно вычисленные из профиля и с помощью математических моделей, отличаются друг от друга в среднем не более, чем на 10 %. Несмотря на то, что для некоторых видов обработки разница в значениях критериев достигла 20 %, все рассмотренные математические модели по точности можно признать практически пригодными. Ведь даже при контроле одной и той же поверхности для профилей, снятых в ее различных местах, разница в значениях критерия  $R_q$  иногда достигает 20 %.

Сравнение измеренных и синтезированных профилей тоже показало хорошее согласование результатов. При этом, конечно, основное внимание следует обращать на глобальный характер профиля, а не на частности.

На основании этих данных упрощенную классическую и автокорреляционную модели можно рассматривать как приблизительно равноценные. Хотя выполненные нами исследования не исчерпывающи, они содержат достаточно обширную информацию, что бы вызвать доверие к рассмотренным моделям.

### ВЫВОДЫ

Анализ математических моделей показал, что микрогеометрию случайных нормально распределенных поверхностей в общем случае можно описать с помощью трех базовых критериев, а в частном случае – с помощью двух.

Однако среди реальных поверхностей многие нельзя считать чисто случайными, а последние не всегда являются нормально распределенными. С достаточной для практики точностью нормально распределенными можно считать чисто шлифованные поверхности. [5] При других видах финишной обработки, например притирке, отклонения от нормального закона распределения могут быть значительными.

Исследования большого количества шлифованных и фрезерованных поверхностей показало, что даже при шлифовании имеет место отклонение от нормального закона распределения. Наименьшие отклонения от нормального закона распределения обеспечивает электроэродирование.

Таблица 2 – Сравнение эффективности математических моделей

	S <sub>0</sub>	K <sub>0</sub>	Критерии, вычисленные по измеренному профилю					Критерии, вычисленные с помощью автокорреляционной модели					Критерии, вычисленные с помощью упрощенной классической модели				
			D <sub>z</sub> , 1/мм	D <sub>p</sub> , 1/мм	H <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>β</sub> , 1/мкм	D <sub>z</sub> , 1/мм	D <sub>p</sub> , 1/мм	H <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>β</sub> , 1/мкм	D <sub>z</sub> , 1/мм	D <sub>p</sub> , 1/мм	H <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>p</sub> , мкм	σ <sub>β</sub> , 1/мкм
Алмазное точение	-0,27	2,51	162,1	158,3	0,04	0,05	0,016	179,6	162,4	0,04	0,05	0,024	173,9	162,8	0,04	0,05	0,025
	-0,23	2,57	149,1	250,6	0,05	0,11	0,052	183,1	255,7	0,05	0,11	0,167	180,0	201,6	0,07	0,11	0,129
	-0,09	3,45	149,1	249,3	0,04	0,11	0,047	169,0	246,3	0,05	0,11	0,159	188,1	209,2	0,07	0,11	0,131
	-0,06	2,64	110,5	240,3	0,04	0,13	0,045	140,4	246,8	0,05	0,13	0,187	144,8	167,0	0,07	0,13	0,124
Круглое шлифование	-0,29	3,55	26,8	30,4	1,87	3,27	0,038	26,4	31,1	1,94	3,48	0,062	29,2	29,2	2,30	3,38	0,055
	-0,09	2,81	47,9	62,9	1,3	1,84	0,074	51,3	66,8	1,00	2,00	0,190	54,6	58,9	1,21	1,95	0,162
	-0,15	3,93	75,3	81,7	0,31	0,57	0,042	75,0	82,7	0,33	0,55	0,065	83,5	79,4	0,38	0,53	0,059
Плоское шлифование	-0,10	3,16	29,6	35,7	1,23	1,99	0,028	34,0	36,5	1,26	2,02	0,044	33,6	31,9	1,43	1,99	0,035
	0,27	3,16	86,8	90,6	0,23	0,42	0,036	86,9	93,7	0,26	0,41	0,057	88,5	82,3	0,30	0,40	0,046
	-0,27	2,86	225,5	220,5	0,09	0,12	0,077	214,5	229,3	0,08	0,13	0,134	225,5	226,4	0,09	0,13	0,130
	0,11	2,82	175,2	192,3	0,12	0,21	0,083	176,9	190,0	0,13	0,21	0,181	210,3	215,6	0,14	0,21	0,201
	-0,19	3,20	179,2	206,4	0,09	0,14	0,075	186,6	208,0	0,09	0,15	0,136	184,1	195,6	0,09	0,15	0,127
	-0,06	2,76	193,3	202,4	0,11	0,18	0,088	185,7	208,8	0,11	0,18	0,171	187,7	198,4	0,12	0,18	0,161
	-0,02	3,01	189,3	216,5	0,09	0,20	0,093	182,0	214,9	0,10	0,18	0,174	182,4	194,2	0,11	0,18	0,154
Прокат	0,19	2,40	49,9	57,6	0,82	1,63	0,061	53,0	59,7	0,86	1,45	0,123	51,5	56,2	0,89	1,45	0,116
	0,19	2,70	30,1	47,4	1,14	2,43	0,072	32,0	53,1	0,87	2,19	0,168	34,2	39,6	1,22	2,13	0,124
	0,1	2,81	26,9	48,7	1,08	2,23	0,067	34,8	55,1	0,82	2,01	0,160	36,9	42,5	1,13	1,95	0,121
	-0,14	2,75	47,4	66,3	0,60	0,95	0,043	53,7	59,7	0,60	0,99	0,084	53,8	58,2	0,61	0,99	0,082
	0,23	3,11	57,6	58,9	1,22	1,89	0,104	60,1	60,1	1,29	1,93	0,164	57,6	61,4	1,22	1,95	0,169

Таким образом, использование моделей, достоверно описывающих случайные нормально распределенные поверхности, имеет определенные ограничения. Кроме того, стандартизированные критерии не обеспечивают полного описания ненормально распределенных поверхностей.

Как показано в работах [6, 7] некоторые из стандартизированных критериев, например средний шаг  $S_m$  микронеровностей для поверхностей, которые нельзя отнести к чисто случайным или к чисто периодическим, не имеют физического смысла. Поэтому трудно решить проблему достоверного описания микрогеометрии поверхностей с помощью различных так называемых комплексных критериев, представляющих различные комбинации из таких информативных критериев и обобщить результаты исследований.

Для полного описания микрогеометрии “сложных” поверхностей, а также быстрого и легкого их определения даже в производственных условиях мы предлагаем использовать непараметрический подход к данной проблеме. [8]

Самую полную информацию о профиле содержат функции плотности распределения его ординат и углов наклона, поэтому в качестве критериев оценки микрогеометрии поверхности рекомендуется использовать графики этих функций.

Используя данный подход, нам удалось показать истинный характер поведения микрорельефа трущихся поверхностей в период установившегося износа [9]. Непараметрические критерии оценки шероховатости оказались более эффективным инструментарием при оптимизации шероховатости для контрастности рисунка, полученного лазерным маркированием, на прецизионных поверхностях роторов шаровых гироскопов. Методика позволила показать влияние микрогеометрии рабочих поверхностей роликовых направляющих на коэффициент трения и на долговечность изделия [8]. Благодаря непараметрическим критериям оценки было показано влияние исходной шероховатости поверхности на приработку зубчатых колес.

Очевидно, что непараметрический подход к проблеме оптимизации микрогеометрии позволит с успехом решать проблемы по повышению конкретных функциональных свойств изделий, которые зависят от характера микрорельефа поверхности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – СПб: СПбГУИТМО (ТУ), 2001. – 264 с.
2. Nayak P.R. Random process model of rough surfaces G. Lubr. Tech., Trans. ASME, July 1971, p. 398-407.
3. Thomas T.R., Sayles R.S. Random process analysis of the effect of waviness of thermal contact resistance Thermophysics a. heat transfer Conf., Boston, MA: AIAA/ASME, July 1974, p. 74-691.
4. Whitehouse D.J. Beta-flinctions for surface typologie Annals of SIRP, 1978, Vol. 27/1, p.491.
5. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
6. Валетов, В.А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности / В.А. Валетов. – В кн.: Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении. Л.: ЛКИ, 1978, С. 62-65.
7. Waletow W., Stauffert G. Moderne Methoden der Oberflächnebforschung Technische Rundschau, 1981, #10, s. 5-7.
8. В.М. Мусалимов Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – СПб.: ПИМаш, 2006. – 168 с.
9. Трибология и надежность: сборник научных трудов X Международной конференции (27-30 октября 2010 г.) Санкт-Петербург/ ред. Проф. К.Н. Войнов. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2010, С.85-92

#### Андреев Юрий Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,  
г. Санкт-Петербург

Аспирант

г. Санкт-Петербург, проспект Косыгина 31-3-75, т. 8-921-897-77-76

E-mail: luser3@yandex.ru

**Валетов Вячеслав Алексеевич**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,  
г. Санкт-Петербург  
Доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения  
г. Санкт-Петербург, Дачный проспект, 19-1-212, т. 8-911-156-49-96  
E-mail: valetov.v@mail.ru

U.S. ANDREEV, V.V. VALETOV

**THE ANALYSIS OF PARAMETRIC METHODS OF SURFACES  
ROUGHNESS DESCRIPTION**

*In the paper the mathematical models, called to provide the full parametric description of the surface profile are considered and analysed. These models are compared with each other and estimated on completeness of the profile description. The method of estimation and control of surfaces roughness based on the nonparametric criteria usage is offered.*

**Keywords:** *parametric description of the surface profile, the mathematical models, surfaces roughness.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Shnejder, Ju.G. Jekspluatacionnye svojstva detalej s reguljarnym mikrorel'efom / Ju.G. Shnejder. – SPb: SPbGUITMO (TU), 2001. – 264 s.
2. Nayak P.R. Random process model of rough surfaces G. Lubr. Tech., Trans. ASME, July 1971, p. 398-407.
3. Thomas T.R., Sayles R.S. Random process analysis of the effect of waviness of thermal contact resistance Thermophysics a. heat transfer Conf., Boston, MA: AIAA/ASME, July 1974, p. 74-691.
4. Whitehouse D.J. Beta-flinctions for surface typologie Annals of SIRP, 1978, Vol. 27/1, p.491.
5. Husu, A.P. Sherohovatost' poverhnostej / A.P. Husu, Ju.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. – M.: Nauka, 1975. – 344 s.
6. Valetov, V.A. O prakticheskoj prigodnosti nekotoryh kriteriev dlja ocenki sherohovatosti poverh-nosti / V.A. Valetov. – V kn.: Tehnologija korpusostroenija, sudovogo mashinostroenija i svarki v sudostroe-nii. L.: LKI, 1978, S. 62-65.
7. Waletow W., Staufert G. Modeme Methoden der Oberflascnebforschung Technishe Rundschau, 1981, #10, s. 5-7.
8. V.M. Musalimov Dinamika frikcionnogo vzaimodejstvija / V.M. Musalimov, V.A. Valetov. – SPb.: PI-Mash, 2006. – 168 s.
9. Tribologija i nadezhnost': sbornik nauchnyh trudov H Mezhdunarodnoj konferencii (27-30 oktjabrja 2010 g.) Sankt-Peterburg/ red. Prof. K.N. Vojnov. – SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobwenija, 2010, S.85-92

**Andreev Yury Sergeevich**

St. Petersburg National Research University, St. Petersburg  
Post-graduate student  
St. Petersburg, prospect Kosygina, 31-3-75,  
Tel. 8-921-897-77-76  
E-mail: luser3@yandex.ru

**Valetov Vyacheslav Alekseevich**

St. Petersburg National Research University, St. Petersburg  
Doctor of technical science, professor of department “Instrument production techniques”  
St. Petersburg, Dachnyj prospect, 19-1-12  
Tel. 8-911-156-49-96  
E-mail: valetov.v@mail.ru

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.9047

М.В. ЩИПАНОВ, А.В. КУЗОВКИН

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Показан механизм изменения геометрии размеров магистралей высокого давления, используемых в оборудовании для электрохимической размерной обработки и технологической оснастки. Предложены методы расчета узлов и магистралей высокого давления, учитывающие виды нагрузок в оборудовании и возможность снижения габаритов гидравлической системы, используемой в станках и оснастке.*

**Ключевые слова:** *магистрали высокого давления, оборудование и оснастка для импульсно-циклической электрохимической обработки, расчет магистралей высокого давления.*

Станки для электрохимической размерной обработки оснащены гидравлическим приводом с давлением жидкости до 3-4 МПа. Если станок работает по схеме импульсно-циклического управления межэлектродным зазором, то требуются громоздкие приводы, размеры которых возрастают по мере увеличения размеров деталей, что занимает основную часть рабочего пространства, увеличивает затраты материала и усложняет размещение технологической оснастки (в частности, контейнеров), которая, как правило, также оснащена гидросистемами для подвода смесей. Все системы станков и технических средств оснащения связаны гидравлическими магистралями, которые требуют создания тоннелей в силовых элементах оборудования. Это снижает прочностные характеристики узлов, требует дополнительных объемов рабочего пространства, но самое главное, увеличивает инерциальное противодействие быстрым перемещениям, например, электродов при импульсно-циклической обработке и ухудшает технологические показатели процесса обработки. Разработки последних десятилетий показали, что совершенствование оборудования и оснастки зависит от диапазонов давлений в гидромагисталях, которое в современных станках достигает 20-25 МПа. Однако здесь возникли большие трудности, так как даже такое возрастание давлений вызывало разгерметизацию даже неподвижных магистралей подачи жидкости, а течи в подвижных элементах начали ограничивать использование в оборудовании и оснастке повышенных давлений рабочей среды.

В авиационных и космических системах используется давление до 40-50 МПа, а в испытательных установках – до 65 МПа и выше [1], [2]. Такие диапазоны давления пытаются применить для гидроприводов протяжных станков, гидродомкратов и в других случаях. Для герметичности соединений были созданы принципиально новые (патенты [3], [4]) уплотнения, которые имеют весьма сложную конструкцию и требуют больших затрат на изготовление и обслуживание. Вместе с тем уплотнения вполне пригодны для электрохимических станков с импульсно-циклической схемой перемещения электродов и гидравлическими узлами оснастки. Сложность представляет прокладка магистралей с минимальным сечением туннелей в оборудовании. Из [5] известно, что при давлениях в трубах свыше 40-50 МПа происходит увеличение их диаметра и укорачивание, достигающие при давлении 65 МПа более 10 мм (длина трубы 12000 мм). В электрохимическом оборудовании может использоваться давление до 130 МПа, что вызовет значительное изменение длины участков магистралей и их геометрии на изогнутых трассах, а также заклинивание и обрыв труб в туннелях.

Авторы разработали новый способ расчета и проектирования формы каналов (в частности труб) с переменной толщиной стенки и заранее заданным изгибом оси на расчетную

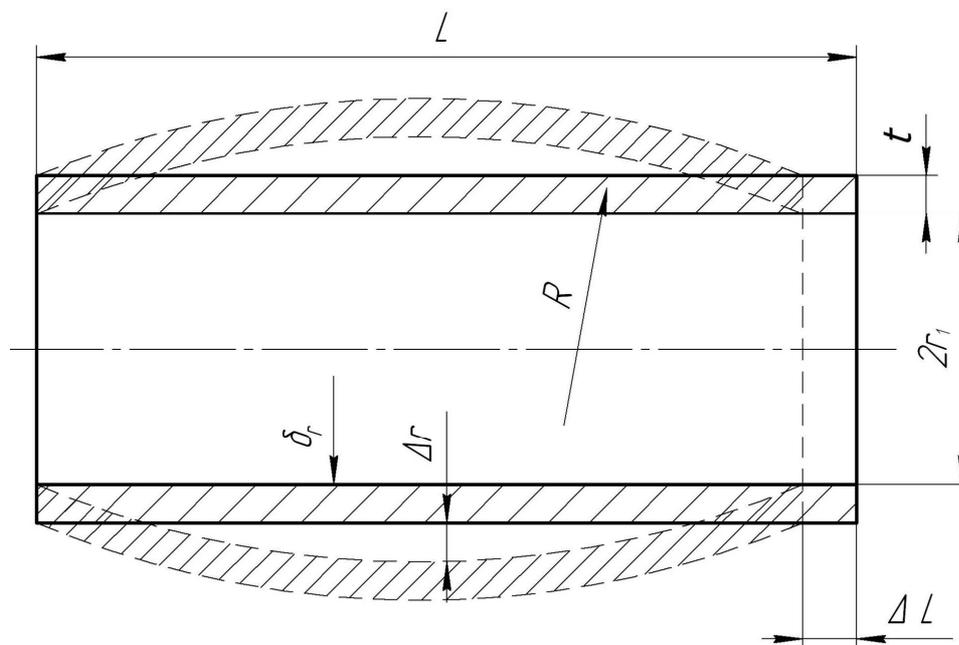
величину «раздутия» магистрали с возможностью минимизации сечения тоннелей. Это позволяет использовать неподвижные, достаточно простые и надежные узлы заделки концов каналов в сопрягаемых узлах станков и оснастки. Исходные данные по проектированию каналов (труб) с высоким внутренним давлением включает:

- расчеты расстояния между местами соединения каналов с сопрягаемыми (как правило неподвижными) узлами оборудования и оснастки;
- геометрические размеры и форму магистралей;
- материал (с характеристиками) используемый для изготовления каналов;
- используемое давление и его характеристики (постоянное, импульсное и др.);

Граничные условия учитывают:

- предельные давления в узлах привода станка и оснастки;
- изменение геометрии канала происходит в области упругих деформаций и подчиняется закону Гука;
- предельные размеры туннелей для прокладки магистралей;
- расчетные наибольшие значения давлений в уплотнительных головках оборудования и оснастки;
- наружные давления пренебрежимо мало по сравнению с внутренним;

Схема расчета высоконапорных магистралей приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Схема деформации трубы при внутреннем давлении**

$L$  – длина трубы между участками заделки;  $t$  – толщина стенки трубы;  
 $r_1$  – радиус внутренней части трубы;  $\Delta r$  – изменение радиуса трубы;  
 $R$  – радиус искривления трубы в продольном сечении;  $\Delta L$  – укорачивание трубы при внутреннем давлении;  $\sigma_r$  – нормальное напряжение в радиальном направлении

Здесь рассматривается наиболее применяемый в технике канал круглого сечения (труба). Из [6] известно, что согласно закону Гука изменение  $\Delta r$  составляет:

$$\Delta r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad (1)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости, для сталей  $E=2 \times 10^5$  МПа;

$\mu$  – коэффициент приведенной длины (коэффициент Пуассона), зависящий от способа закрепления концов и места приложения нагрузки. По [6] для труб без промежуточной опоры  $\mu=0,5$ ;

$\sigma_r$  – нормальное напряжение в радиальном направлении;

$\sigma_x, \sigma_y$  – предел прочности по координатам  $x, y$ .

Величина внутреннего давления должна ниже наибольшего напряжения  $\sigma_t$  при упругих деформациях (предел пропорциональности)

$$\sigma_t = \sigma_s \cdot n \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел прочности материала трубы на растяжение;

$n$  – коэффициент запаса текучести. Для постоянного течения  $n=1.3-2$ , для импульсного  $n=2-2.7$ .

Есловие правомерности использования закона Гука

$$\sigma_r \leq \sigma_t \quad (3)$$

При этом толщина трубы должна превышать некоторую величину, отвечающую условию (3):

$$t \geq t_{\text{пред}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{пред}}$  – предельно допустимая нижняя граница толщины трубы.

Определяет допустимое давление внутри трубы при выбранной толщине или служит основанием для выбора трубы с требуемой толщиной стенки. Величина  $t_{\text{пред}}$  может быть найдена из формулы полученной по зависимости Ляме [6] с учетом того, что давление снаружи ( $p_2$ ) мало по сравнению с давлением в трубе ( $p_1$ ):

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2}{(r_1 + t)^2 - r_1^2} - \frac{p_1 r_1^2 (r_1 + t)^2}{[(r_1 + t)^2 - r_1^2] \rho^2} \quad (5)$$

где  $\sigma_r$  находят из справочных данных по зависимостям (2) и (3), для  $\rho=r_1$ :

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2}{(2r_1 + t)t} - \frac{p_1 r_1^2 (r_1 + t)^2}{t(2r_1 + t)r_1^2} \quad (6)$$

откуда

$$t_{\text{пред}} \geq \frac{-\frac{\sigma_t}{n} r_1 + \sqrt{r_1^2 \left( \frac{\sigma_t^2}{n^2} r_1 - 2p_1 \frac{\sigma_t}{n} - 2p_1^2 \right)}}{\frac{\sigma_t}{n} + p_1} \quad (7)$$

Уширение трубы (в середине длины):

$$\Delta r = \frac{(1 - \mu) p_1 r_1^2}{E[(r_1 + t)^2 - r_1^2]} \times \left[ (1 - \mu) r_1 + \frac{(1 + \mu)(r_1 + t)^2}{r_1} \right] \quad (8)$$

Диаметр  $D$  трубы при внутреннем давлении  $p_1$  в середине длины ( $L/2$ ):

$$D = 2(r_1 + \Delta r) = 2 \left\{ r_1 + \frac{1}{E} \times \frac{p_1 r_1^2}{t(2r_1 + t)} \times \left[ (1 - \mu) r_1 + (1 + \mu)(r_1 + t)^2 \times \frac{1}{r_1} \right] \right\} \quad (9)$$

Из геометрических построений, принимая радиус  $R$  изгиба трубы по длине постоянным, а наибольшее изменение радиуса  $\Delta r_1$ , можно найти  $\Delta L$ :

$$\Delta L = L - L_1 \quad (10)$$

где  $L_1$  – длина трубы после подачи давления, тогда

$$\Delta L = L - \sqrt{L^2 + \frac{16}{3} \Delta r_1^2} \quad (11)$$

Эксперименты на испытательной установке [7] показали, что при длине магистрали 3 метра и давлении 70 МПа укорачивание трубы составляет 8,31 мм. Следовательно, в конструкции системы должны быть предусмотрены подвижные опоры, изменяющие свое положение по мере укорачивания или удлинения магистральной трубы.

Предельное изменение длины трубы при максимальном давлении внутри ее составляет более 10 мм. Если принять для испытательной установки схему с неподвижной опорой, то ось трубы сместится до 4 мм и возникнет большой изгиб, что может вызвать разрушение трубы. Поэтому опоры в системе должны быть подвижными и постоянно поддерживать совпадение осей трубы и направления действия сил. Принятая в установке схема закрепления концов труб позволяет устранить повреждение концевых резьб. При такой схеме за счет давления жидко-

сти на торцы возникают большие продольные сжимающие силы (их величина может превышать  $5 \cdot 10^6$  Н), вызывающие потерю продольной устойчивости трубы. Это нежелательное явление устраняют установкой по длине трубы дополнительных опор с прижимами.

Тогда размер туннеля для свободного монтажа труб и возможности их продольного перемещения под давлением определяется диаметром  $D_T$ :

$$D_T = 2K(2r_1 + 2\Delta r), \quad (12)$$

где  $K$  – коэффициент запаса просвета между стенками туннеля и наружным диаметром трубы ( $K=1,2-1,3$ ).

По [3], [4] предложена конструкция уплотнения для надежной заделки концов труб в деталях оснастки и станков. По [5] расчет уплотнений выполняется с учетом изменения геометрических размеров магистралей под действием давления. Уплотнение трубы выполняют из упругого материала (обычно из полиуретана) с возможностью расширения в радиальном и осевом направлении (рис. 2).

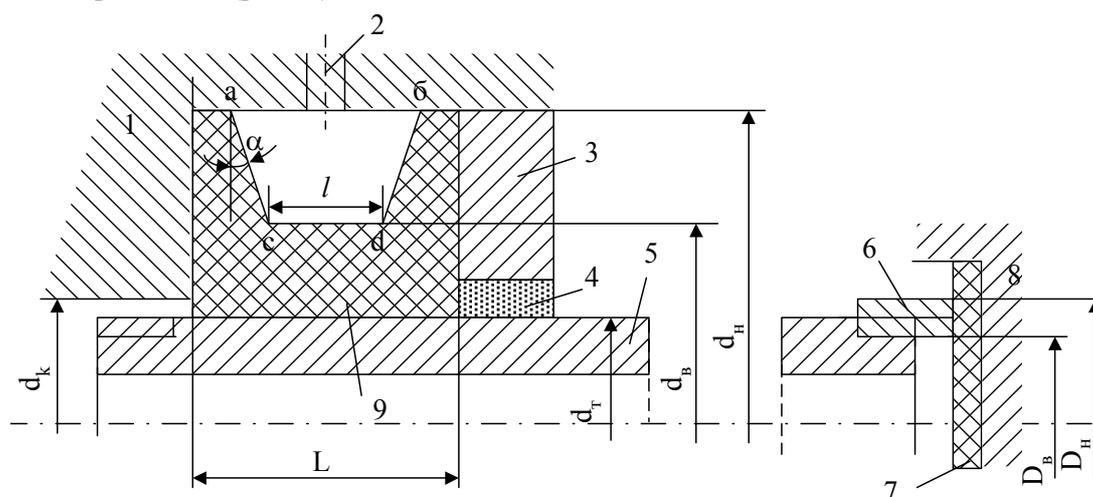


Рисунок 2 – Схема уплотнений в станке и оснастке

- 1 – корпус; 2 – канал для подвода жидкости в уплотнение 9;  
 3 – подвижная уплотнительная головка; 4 – уплотнение подвижной головки;  
 5 – магистральная труба; 6 – муфта трубы; 7 – уплотнение неподвижной головки 8;  
 L – длина контактной поверхности уплотнения с трубой; l – длина кольцевой поверхности полости уплотнения;  $\alpha$  – угол уклона боковых стенок полости;  
 $d_m$  – наружный диаметр трубы;  $d_n, d_h$  – внутренний и наружный диаметр полости уплотнения;  
 $d_k$  – диаметр отверстия в корпусе;  $D_n, D_h$  – внутренний и наружный диаметр муфты

В расчетах принято, что давление, подаваемое в полость уплотнения, должно обеспечивать герметичность по всему наружному контуру трубы и не допускать ее пластической деформации, потери устойчивости во всем диапазоне испытываемых давлений. Предполагается также, что давление, подаваемое в полость, не приводит к разгерметизации стыковочных узлов установки. Сила  $F_c$ , вызывающая сдвиг уплотнения, не может превышать силы трения ( $F_{тр}$ ):

$$F_c \leq F_{тр}, \quad F_{тр} = f \cdot N, \quad (13)$$

где  $f$  – коэффициент трения уплотнения о трубу;

$N$  – нормальная сила прижима.

$$N = \pi d_r \cdot L \cdot N_{уд}, \quad (14)$$

где  $N_{уд}$  – удельная сила прижима.

Сила прижима  $N$  создается давлением жидкости, поступающей через отверстие 2 в полость уплотнения ( $P_3$ )

$$P_3 = P_3 \left( \pi d_n \cdot l + \pi t g \alpha (d_n - d_n)^2 \right) \quad (15)$$

где  $P_3$  – давление в полости уплотнения; остальные обозначения см. на рисунке 2.

Из (15) при условии  $N = P_3$  находим давление жидкости в полости уплотнения или, при заданном давлении, наружный диаметр уплотнения  $d_n$ :

$$P_3 = \frac{P_u}{4f} \times \frac{(d_k^2 - d_m^2)}{[d_6 \cdot l + \operatorname{tg} \alpha (d_n - d_6)^2]}, \quad (16)$$

$$d_n = d_6 \pm \sqrt{\frac{P_u (d_k^2 - d_m^2)}{4fP_3 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{d_6 \cdot l}{\operatorname{tg} \alpha}}. \quad (17)$$

В процессе герметизации уплотнение расширяется в радиальном и осевом направлении, перемещая трубу к уплотнению 7 (рис. 2) неподвижной головки 8. Для получения надежного уплотнения необходимо рассчитать соотношение площадей цилиндрической части полости ( $F_{\text{ц}}$ ) и одной из боковых сторон ( $F_{\text{бок}}$ ), которые пропорциональны соотношению контактной поверхности уплотнения с трубой к торцу муфты со стороны неподвижной головки.

Давление прижима ( $P_{\text{п}}$ ) трубы к уплотнению 7 (рис. 2) должно быть не меньше, чем величина отжима ( $P_{\text{о}}$ ) под действием давления внутри трубы при испытании.

$$P_o = P_u \cdot \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_6^2) \quad (18)$$

Сила  $P_o$  гасится давлением ( $P_6$ ) на боковую сторону в полости уплотнения

$$P_6 = P_3 \cdot \pi d_6 \frac{d_n - d_6}{\cos \alpha} \quad (19)$$

Из (18), (19) находим высоту полости  $h$ :

$$h = \frac{P_u}{8P_3} \times \frac{(D_n^2 - D_6^2)}{d_6} \cdot \cos \alpha \quad (20)$$

Приведенные зависимости позволяют установить основные размеры уплотнений в зависимости от вида испытываемой трубы. Алгоритм проектирования уплотнения приведен на рисунке 3.

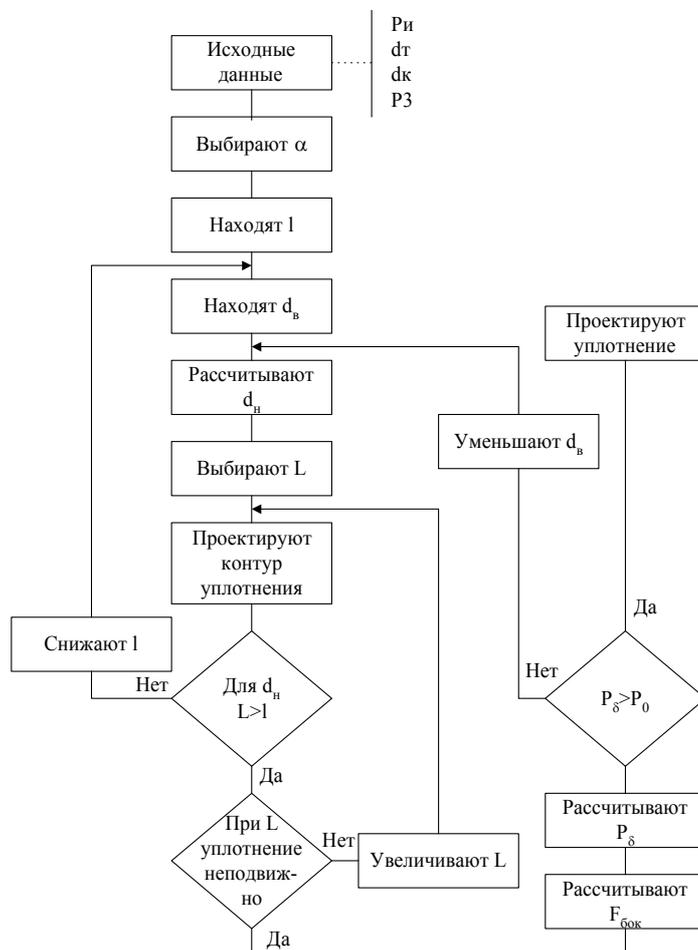


Рисунок 3 – Алгоритм расчета и проектирования уплотнения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен механизм изменения геометрии размеров магистралей высокого давления, используемых в оборудовании для электрохимической размерной обработки и технологической оснастки, что позволило предложить новые конструкции уплотнений для изучаемого оборудования.

2. Разработаны методы расчета узлов и магистралей высокого давления, учитывающие виды нагрузок в оборудовании и возможность снижения габаритов гидравлической системы, используемой в станках и оснастке.

3. Приведены рекомендации по проектированию узлов с магистралями высокого давления и обоснованы границы их использования в оборудовании для импульсно-циклической электрохимической обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелякин, А.И. Разработка гидросистем высокого давления для промышленного оборудования / А.И. Шелякин // Металлообработка. – 2004. – №4. – С. 31-37.
2. Шелякин, А.И. Технология испытания гидросистем высокого давления / А.И. Шелякин // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 6. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2003 – С. 27-31.
3. Патент 2183825 (РФ) / Уплотнительная головка / А.И. Шелякин и др. Бюллетень изобр. № 17, 2002.
4. Патент 2218498 (РФ) / Уплотнительная головка / А.В. Бондарь и др. Бюллетень изобр. № 34, 2003.
5. Бондарь, А.В. Расчет уплотнительного соединения трубы в испытательной установке / А.В. Бондарь, В.П. Смоленцев, А.Н. Некрасов // Нетрадиционные технологии машиностроения и приборостроения: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 5. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2002 – С. 63-66.
6. Справочник металлиста. в 5 т. т. 1. Под ред. С. А. Чернавского и В.Ф. Рещикова. // М.: Машиностроение. 1976 - 768 с.
7. Изменение радиальных и осевых размеров труб при испытаниях высоким давлением / А.И. Часовских и др. // Нетрадиционные технологии машиностроения и приборостроения: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 5. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2002 - с. 67-71.

### Щипанов Михаил Викторович

Воронежский государственный технический университет  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел.: 8-950-754-08-04  
E-mail: smifov@ya.ru

### Кузовкин Алексей Викторович

Воронежский государственный технический университет  
Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии космонавтики,  
зав. кафедрой «Начертательной геометрии и машиностроительного черчения»  
Тел.: 8 (473) 254-57-84  
E-mail: akuzovkin@mail.ru

M.V. SHCHIPANOV, A.V. KUZOVKIN

## DESIGN OF HIGH PRESSURE MAIN LINES FOR TECHNOLOGICAL AND ELECTROCHEMICAL EQUIPMENT

*In this work we are studying the mechanism of change of configuration of the sizes of the high pressure main lines which is used in equipment for electrochemical dimensional processing and industrial gears. We offer methods of calculation of knots and the high pressure main lines which takes into consideration kinds of loadings in the equipment and possibility of decrease in dimensions of the hydraulic system is used in machine tools and gears.*

**Keywords:** high pressure main lines, equipment and gears for pulsed and cyclic electrochemical processing, calculation of high pressure main lines.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Sheljakin, A.I. Razrabotka gidrosistem vysokogo davlenija dlja promyshlennogo oborudovanija / A.I. Sheljakin // Metalloobrabotka. – 2004. – №4. – S. 31-37.
2. Sheljakin, A.I. Tehnologija ispytaniya gidrosistem vysokogo davlenija / A.I. Sheljakin // Netradicionnye metody obrabotki: mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 6. Voronezh: Izd-vo VGTU, 2003 – S. 27-31.
3. Patent 2183825 (RF) / Uplotnitel'naja golovka / A.I. Sheljakin i dr. Bjulleten' izobr. № 17, 2002.
4. Patent 2218498 (RF) / Uplotnitel'naja golovka / A.V. Bondar' i dr. Bjulleten' izobr. № 34, 2003.
5. Bondar', A.V. Raschet uplotnitel'nogo soedinenija truby v ispytatel'noj ustanovke / A.V. Bondar', V.P. Smolencev, A.N. Nekrasov // Netradicionnye tehnologii mashinostroenija i priborostroenija: mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 5. Voronezh: Izd-vo VGU, 2002 – S. 63-66.
6. Spravochnik metallista. v 5 t. t. 1. Pod red. S. A. Chernavskogo i V.F. Rewikova. // M.: Mashino-stroenie. 1976 - 768 s.
7. Izmenenie radial'nyh i osevyh razmerov trub pri ispytaniyah vysokim davleniem / A.I. Chasovskih i dr. // Netradicionnye tehnologii mashinostroenija i priborostroenija: Mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 5. Voronezh: Izd-vo VGU, 2002 - s. 67-71.

**Shchipanov Mihail Viktorovich**

Voronezh state technical university

Post-graduate student of department “Mechanical engineering technology”

Tel. 8-950-754-08-04

E-mail: smifov@ya.ru

**Kuzovkin Aleksey Viktorovich**

Voronezh state technical university

Doctor of technical science, professor, corresponding member of Russian Academy of Cosmonautics, head of department “Descriptive geometry and mechanical drawing”

Tel. 8-473-254-57-84

E-mail: akuzovkin@mail.ru

УДК 629.7.04

О.П. МУЛЮКИН, О.Ю. ГРИГОРЬЕВА, М.П. ДУДИН, М.И. БОРЗЕНКОВ

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КЛАПАННО-СЕДЕЛЬНЫХ ПАР ПНЕВМОГИДРОАРМАТУРЫ

*Освещены особенности рационального выбора показателей эксплуатационной надежности клапанно-седельных пар пневмогидроарматуры с учетом влияния на них основополагающих деструктивных факторов. Систематизированы среднестатистические данные по эксплуатационной надежности наиболее распространенных типов клапанных уплотнений пневмогидроарматуры.*

**Ключевые слова:** клапанная пневмогидроарматура; клапанно-седельная пара; клапанное уплотнение, привод, пружина, упругий элемент, показатели эксплуатационной надежности; быстроедействие; герметизирующая способность; ресурс; погонная нагрузка; удельное контактное давление герметизации; коэффициент динамичности; деструктивные факторы.

Расчет показателей надежности клапанной пневмогидроарматуры (КПГА) мобильной транспортной техники, стандартизированных ГОСТ 1377-75 «Надежность в технике. Термины и определения», освещен в [1, 2]. Вклапаном агрегатостроении помимо расчета основных показателей надежности КПГА (безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность) проводят количественную оценку эксплуатационной надежности их клапанно-седельных пар (КСП), характеризуемую тремя показателями входящих в их состав уплотнительных соединений, - клапанных уплотнений (КУ):

1. Быстроедействие перекладки,  $\tau$  [с] – время отхода клапана от седла на требуемый рабочий ход для выдачи КПГА заданного расхода рабочей среды или время прохождения этого хода до посадки клапана на седло под действием перепада давления рабочей среды, силы упругого элемента или под действием усилия автономного привода при подаче на него управляющего сигнала.

2. Герметизирующая способность (или “герметичность” – широкораспространенный производственный термин – практицизм),  $\Delta G$  [см<sup>3</sup>/с и др., - см. данные таблицы 1, 2 ГОСТ 1001128-74, характеризующие количественную оценку герметизирующей способности КУ в виде скорости утечки, - массы или объема среды в единицу времени] – свойство КСП обеспечивать допустимую величину утечки герметизируемой среды через КУ в единицу времени, определяемую из условий нормальной работы КПГА в составе пневмогидросистемы объекта, безопасности его эксплуатации и охраны окружающей среды.

Таблица 1 – Нормы количественной оценки герметичности изделий, работающих под давлением жидкости

Группы	Нормы см <sup>3</sup> /с, не более	Группы	Нормы см <sup>3</sup> /с, не более
1-1	10 <sup>-12</sup>	1-11	8,5·10 <sup>-5</sup>
1-2	10 <sup>-11</sup>	1-12	1,4·10 <sup>-4</sup>
1-3	10 <sup>-10</sup>	1-13	2,8·10 <sup>-4</sup>
1-4	2·10 <sup>-10</sup>	1-14	5,5·10 <sup>-4</sup>
1-5	10 <sup>-9</sup>	1-15	10 <sup>-3</sup>
1-6	2·10 <sup>-9</sup>	1-16	2,8·10 <sup>-3</sup>
1-7	10 <sup>-8</sup>	1-17	1,5·10 <sup>-2</sup>
1-8	10 <sup>-6</sup>	1-18	4·10 <sup>-2</sup>
1-9	3·10 <sup>-5</sup>	1-19	8,6·10 <sup>-2</sup>
1-10	5,5·10 <sup>-5</sup>	1-20	1,5·10 <sup>-1</sup>

Таблица 2 – Нормы количественной оценки герметичности изделий, работающих под давлением сжатого газа или под вакуумом

Группы	Нормы мкм рт. ст. л , с не более	Нормы см <sup>3</sup> /с, не более	Группы	Нормы мкм рт. ст. л , с не более	Нормы см <sup>3</sup> /с, не более
2-1	10 <sup>-9</sup>	8,16·10 <sup>-11</sup>	2-7	2·10 <sup>-2</sup>	1,632·10 <sup>-3</sup>
2-2	10 <sup>-7</sup>	8,16·10 <sup>-9</sup>	2-8	10 <sup>-1</sup>	8,17·10 <sup>-3</sup>
2-3	10 <sup>-5</sup>	8,16·10 <sup>-7</sup>	2-9	2·10 <sup>-1</sup>	1,632·10 <sup>-2</sup>
2-4	10 <sup>-4</sup>	8,16·10 <sup>-6</sup>	2-10	1	8,16·10 <sup>-2</sup>
2-5	10 <sup>-3</sup>	8,16·10 <sup>-5</sup>	2-11	10 <sup>2</sup>	8·10
2-6	10 <sup>-2</sup>	8,16·10 <sup>-4</sup>	2-12	5·10 <sup>3</sup>	408

3. Ресурс, N – число циклов срабатываний КСП (количество отходов клапана от седла с последующей посадкой на седло, - число двойных ходов клапана) или временной интервал в течение которого при срабатывании КСП сохраняются требуемые герметичность и быстродействие.

В инженерной практике герметичность КСП КПА при идентичности внешних воздействующих факторов определяется фактическими величинами следующих показателей клапанного уплотнения:

1. Погонной нагрузкой q, Н/мм для КУ с контактом по линии диаметром d (рис. 1, а):

$$q = \frac{P}{\pi d},$$

где P – усилие поджатия запорного органа к седлу, Н;

d – диаметр седла, мм.

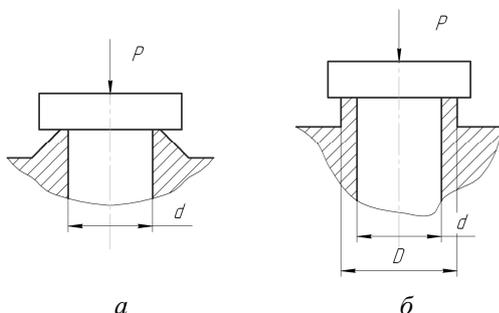


Рисунок 1 – Конструктивные схемы КУ с контактом по линии (а) и с контактом по плоскости (б)

2. Удельным контактным давлением герметизации R<sub>уд</sub>, МПа для КУ с контактом по плоскости, ограниченной диаметрами D и d (рис. 1, б):

$$R_{уд} = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)},$$

В первом приближении (до получения результатов испытаний КСП на герметичность) удельное давление R<sub>уд</sub> на поверхность упругого уплотнительного элемента, обеспечивающее требуемую герметичность КУ, выбирают меньшим предела прочности σ<sub>сж</sub> на сжатие уплотнительного материала с учетом принятого запаса по прочности n:

$$R_{уд} < \frac{\sigma_{сж}}{n}.$$

3. Коэффициентом, учитывающим превышение динамической нагрузки над статической, в ряде случаев называемым коэффициентом динамичности:

$$K_d = \frac{P_{дин}}{P_{ст}},$$

где P<sub>ст</sub> – статическая нагрузка (усилие герметизации КУ без учета кинетической энергии соударения запорного органа с седлом в момент контакта, Н);

$R_{дин}$  – динамическая нагрузка (усилие герметизации КУ с учетом кинетической энергии соударения запорного органа с седлом в момент контакта, Н).

По данным [3] коэффициент динамичности  $K_D$  в ряде случаев достигает величины 70 и выше.

Параметры  $q$ ,  $R_{уд}$ ,  $K_D$  оцениваются на этапе нормальной эксплуатации и не распространяются на этапы приработки и износа элементов КУ (рисунок 2).

В качестве пояснения к рисунку 2 отметим, что теория надежности различает три характерных вида отказов [2]:

1. Прирабочные отказы – могут иметь место вследствие нарушения технологического процесса или некачественного изготовления. Такие отказы выявляются, как правило, на ранней стадии жизненного цикла изделия при приемо-сдаточных испытаниях на заводе-изготовителе и при испытаниях входным контролем у потребителя, т.е. до установки агрегата на основной объект.

2. Износные отказы – могут возникать в результате неправильного обслуживания, неправильного применения агрегата, а также в результате «старения» материалов и естественного износа. В большинстве случаев такие отказы могут быть предотвращены путем повышения культуры обслуживания, приведения условий эксплуатации в соответствие с требованиями технических условий на агрегаты, своевременного ремонта и замены его на новый по истечении установленных ресурсов до первого ремонта, межремонтного и назначенного.

3. Внезапные отказы – возникают вследствие внезапной концентрации нагрузок по каким-либо параметрам. Внезапные отказы носят случайный характер и подчиняются общим закономерностям теорий вероятности, так что частота отказов в течении достаточного большого периода времени примерно постоянна.

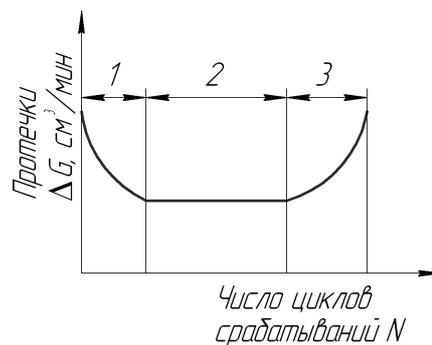
Таким образом, с учетом вышеизложенного, задача обеспечения надежности состоит в максимальном исключении прирабочных отказов в производстве и у потребителя, предупреждений износных отказов путем постепенного выявления и устранения их причин, определении технически обоснованных межремонтных ресурсов и сроков службы, уменьшении до минимума или полном устранении внезапных отказов.

В частности, в производстве очень часто производят так называемую «тренировку» КСП арматуры путем выработки части ресурса  $N$  (соответственно этап 1 на рис. 2) для так называемого «выжига» технологических дефектов в уплотнительном материале. И хотя это приводит к некоторому снижению назначенного ресурса КПА, но зато в эксплуатации исключаются прирабочные отказы КСП.

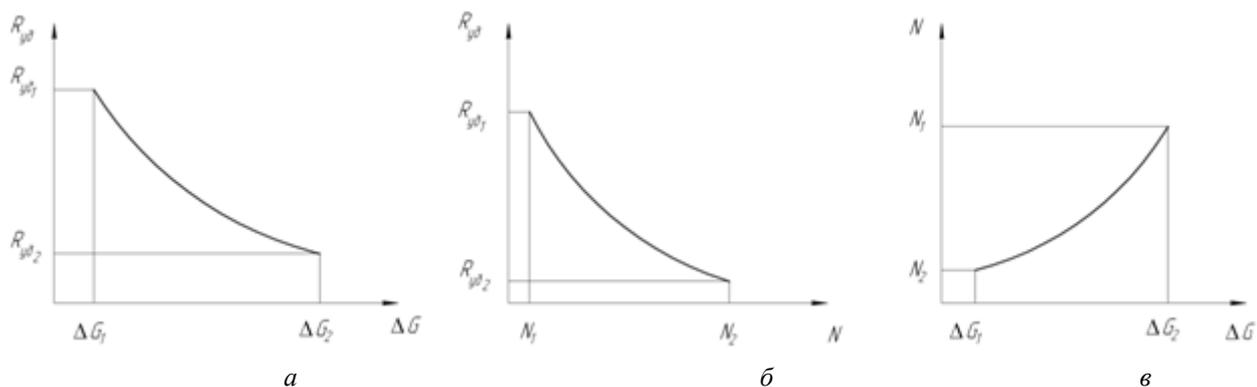
В работе [1] показано, что рациональный выбор соотношения взаимосвязанных, полно влияющих друг на друга показателей  $\tau$ ,  $\Delta G$  и  $N$  обеспечивается при минимизации энергии соударения уплотняющих поверхностей КСП и соответственно, минимальном усилии герметизации  $F_{min}$ , потребном для обеспечения заданной степени герметичности в зоне уплотнительного соединения, создаваемого приводом, упругим элементом или перепадом давления герметизируемой среды.

Выбор допустимого минимального значения  $F_{min}$ , а, следовательно, удельного контактного давления  $R_{уд}$  в уплотнительном соединении КСП должен согласовываться с требованиями обеспечения заданных пределов изменения показателей  $\Delta G$  и  $N$ , то есть носить компромиссный характер (рис. 3).

Характер представленной на рисунке 3 качественной взаимосвязи показателей  $R_{уд}$ ,  $\Delta G$  и  $N$  предопределен тем, что рост  $R_{уд}$ , с одной стороны снижает утечки  $\Delta G$  через КУ, но, с другой стороны, снижает ресурс  $N$  работы последнего.

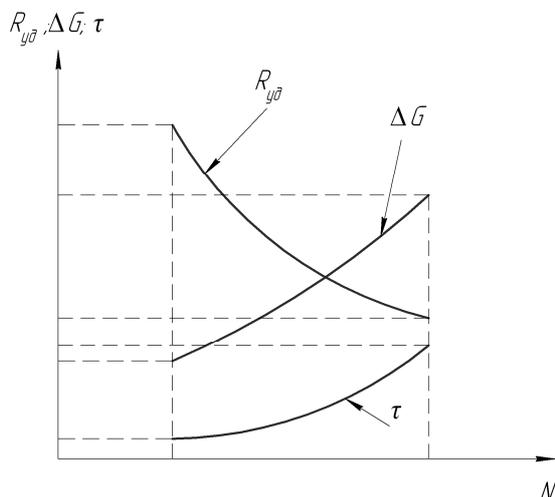


**Рисунок 2 – Зависимость величины протечек среды  $\Delta G$  через КУ от числа циклов срабатываний  $N$  запорного органа**  
 1 – этап приработки; 2 – этап нормальной эксплуатации; 3 – этап износа элементов КУ при контактировании



**Рисунок 3 – Качественная взаимосвязь полярно влияющих друг на друга показателей  $R_{yд}$ ,  $\Delta G$  и  $N$**   
 а – влияние усилия герметизации (параметра  $R_{yд}$ ) на величину утечек среды  $\Delta G$  через КУ;  
 б – влияние усилия герметизации (параметра  $R_{yд}$ ) на ресурс  $N$  клапанного уплотнения;  
 в – влияние ресурса  $N$  на утечки среды  $\Delta G$  через КУ;  
 $\Delta G_1$ ,  $\Delta G_2$  – минимальное и максимальное значения утечек среды через КУ при принятом диапазоне изменения усилия герметизации ( $R_{yд1} \dots R_{yд2}$ ) или ресурса ( $N_1 \dots N_2$ ), см. рисунки 3, а, в;  $N_1$ ,  $N_2$  – минимальное и максимальное значения ресурса при принятом диапазоне изменения усилия герметизации ( $R_{yд1} \dots R_{yд2}$ ), - см. рисунок 3, б.

Качественный характер полярной взаимосвязи показателей эксплуатационной надежности КСП КПА представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Взаимосвязь параметров  $R_{yд}$ ,  $\Delta G$ ,  $\tau$  и  $N$  для КСП типовой конструкции КПА**

Из рисунка 4 следует, что при уменьшении параметра  $\tau$  снижается ресурс работы КУ. Это обусловлено тем, что при снижении  $\tau$  происходит возрастание скорости движения клапана к седлу, а следовательно, увеличение кинетической энергии подвижных частей клапана, которая в момент контакта последнего с седлом переходит в потенциальную энергию  $E_{п}$ , негативно влияющую на ресурс (износ) уплотнителя КСП.

Результаты выполненных при участии авторов исследований позволили выделить и оценить основополагающие деструктивные факторы, негативно влияющие на показатели эксплуатационной надежности КСП типовых конструкций КПА:

1. Неоднородность нагружения отдельных участков материала уплотнителя КСП в процессе его деформирования при посадке клапана на седло вследствие заложенных в конструкцию клапанной

арматуры на стадиях проектирования и изготовления:

- несоосности центрирующих осей элементов КСП (клапан, седло, уплотнитель клапана, пружина или иной упругий элемент) и кинематически связанных с ними других элементов конструкции;
- несоосного приложения герметизирующего усилия от упругого элемента или исполнительного органа силового привода непосредственно к подвижному элементу КСП либо к размещенной между ними кинематической связке.

2. Сверхдопустимое динамическое нагружение уплотнителя КСП при превышении фактической скорости посадки клапана на седло лимитированного расчетного значения, а также при наличии колебаний упругоподвешенных масс КСП, сопровождающихся отскоком от седла и вторичным их соударением.

3. Неблагоприятное длительное воздействие как отдельных, так и комплекса составляющих климатических нагрузок (температура, влажность и засоренность рабочей и окружающей сред, термоциклирование элементов конструкции арматуры рабочей средой и пр.) в процессе эксплуатации КПА, ухудшающее физико-механические свойства материала уплотнителя, в первую очередь упругость, и вызывающие его преждевременное старение (износ).

Кроме того, данный деструктивный фактор усугубляет явления схватывания, адгезии и льдообразования в плунжерных и золотниковых сопряжениях КСП, способных привести к заклиниванию элементов сопряжений, то есть к нарушению работоспособности (отказу) КППА в эксплуатации. Причем в криогенной технике мероприятия по устранению негативного влияния этого фактора на работоспособность центрируемых подвижных элементов КСП выходят на первый план.

Также отметим, что данные эксплуатации общепромышленной трубопроводной КППА свидетельствуют, что ремонт или замену КУ приходится производить в зависимости от вида арматуры и уплотнительного материала: через 80...800 циклов – клапанов, работающих с ударом (пускоотсечные, предохранительные, обратные); через 400...600 – задвижек; через 10000 циклов – электромагнитных клапанов. В большинстве случаев это обусловлено тем, что многие общепромышленные клапаны обеспечивают малые утечки, но за счет увеличения массы и мощности привода, негативно влияющих на ресурс КУ [2, 5].

В таблице 3 представлены систематизированные авторами среднестатистические данные о степени герметичности и ресурсе наиболее распространенных типов КУ [1-3].

Таблица 3 – Среднестатистические данные о степени герметичности и ресурсе некоторых типов КУ

Тип клапанного уплотнения	Режим нагружения q, Н/см; (R <sub>уд</sub> , МПа)	Число циклов срабатываний (ресурс)	Средние протечки газа (см <sup>3</sup> /мин) при температуре		
			25°C	-196°C	-250°C
1. Уплотнение плоское (рис.1, а): седло из стали 11Х18Н10Т, клапан из:	При хранении (*) и работе в системе				
латуни ЛС59	(50...70)	до 200 200...5000	0,1...0,15 0,3...5	0,3 0,6...10	до 10 10...30
фторопласта-4	(до 5)*; (30...70)	60...100 свыше 100	0 5...10	0,1 40...70	20...100 до 300
фторопласта-3	(до 10)*; (30...70)	20...100 свыше 100	0,3 5...10	0,6 до 200	- -
поликарбоната ПК-М-3	(20...30)*; (40...80)	до 5000	0	0,13	50...100
полиамида 610	(до 20)*; (25...40)	200...2000	0,5	-	-
капрона	(до 30)*; (40...50)	5000	0,5	5...20	-
2. Уплотнение на скругленную кромку (рис.1,б): седло из стали 11Х18Н10Т, клапан из:					
эластомера каучука СКС-30	10...40*; 20...2500	до 10000	0	-	-
поликарбоната ПК-М-3	250...700*; 800...10000	5000-10000	0	0,03	до 50

Анализ вышеизложенных результатов показывает, что неверный выбор типа или материалов уплотнений, их низкое качество или неправильная эксплуатация резко снижают эксплуатационную надежность КУ КППА и способны привести к отклонениям показателей эксплуатационной надежности КППА, пневмогидросистемы, энергетической установки и объекта в целом [4].

В заключении отметим, что вышеизложенные особенности работы КППА и возникающие при этом в их КСП динамические явления позволяют классифицировать этот вид механических систем как ударные, с ограниченным ресурсом работы. В связи с этим представляется целесообразным проведение анализа состояния исследований надежности КППА по трем основным направлениям: динамика срабатывания клапана (этап работы клапана от момента подачи управляющего сигнала до момента контакта клапана с седлом); динамика нагружения клапанной пары (динамические нагрузки и явления в период взаимодействия клапана и седла) и вопросы эксплуатации арматуры в условиях воздействия знакопеременных внешних нагрузок.

Успешное решение проблемы создания высоконадежных КППА, по мнению авторов, должно базироваться на систематизации и исследовании данных по повторяющимся отказам КППА на промышленных предприятиях и в эксплуатации.

При этом главная задача состоит в оценке, на сколько значение ресурса, определенное по предельному состоянию (отказу), отличается от назначенного. Для ее решения требуется тщательное рассмотрение процессов, предшествующих появлению отказов, изучение причин и механизма их возникновения.

### ВЫВОДЫ

1. Охарактеризованы особенности рационального выбора полярно влияющих друг на друга показателей эксплуатационной надежности клапанно-седельных пар пневмогидроарматуры.

2. Выделены основополагающие деструктивные факторы и оценена степень их влияния на показатели эксплуатационной надежности клапанно-седельных пар типовых конструкций клапанной пневмогидроарматуры.

3. Систематизированы среднестатистические данные о степени герметичности и ресурсе наиболее распространенных типов клапанных уплотнений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулюкин, О.П. Гидропневмотопливные агрегаты и их надежность: Монография [Текст]/Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1990. – 104 с.
2. Мулюкин, О.П. Гидропневмотопливные клапанные агрегаты с управляемым качеством динамических процессов: Учебно-справочное пособие [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, А.Н. Кирилин и др. – Самара: СГАУ, 2000. – 546 с.: ил.
3. Долотов, А.М. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов: Учебное пособие [Текст]/А.М. Долотов, П.М. Огар, Д.Е. Чегодаева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 296 с.: ил.
4. Дудин, М.П. Особенности компромиссного выбора предельных значений выходных параметров беспружинных электропневмоклапанов мобильной транспортной техники [Текст]/О.Е. Лаврусь, М.П. Дудин, А.М. Долотов//Вестник СамГУПС. – Выпуск №1(11). – Самара: СамГУПС, 2011. – С. 145-149.
5. Дудин, М.П. Возможности и области применения методов оценки ресурса уплотнительных затворов пневмогидроарматуры [Текст]/А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин, М.П. Дудин//Наука и образование транспорту: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (20-21 октября 2011 г., г. Оренбург). – Самара: СамГУПС, 2011 – с. 245-246.

#### Мулюкин Олег Петрович

Самарский государственный университет путей сообщения

Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Инженерная графика»

Заслуженный изобретатель Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Российской Федерации

443063, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19

Тел.: 8-963-916-06-34

E-mail: om46@mail.ru

#### Григорьева Ольга Юрьевна

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс

Аспирант

302020, Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел: (4862)43-48-90

E-mail: met\_lit@ostu.ru

#### Дудин Михаил Павлович

Самарский государственный университет путей сообщения

Аспирант

443063, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19

Тел.: 8-927-687-96-78

E-mail: ripperhead@mail.ru

**Борзенков Михаил Иванович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел: (4862)43-48-90  
E-mail: bim5155@yandex.ru

O.P. MULJUKIN, O.JU. GRIGORIEVA, M.P. DUDIN, M.I. BORZENKOV

**ESTIMATION OF INFLUENCE OF DESTRUCTIVE FACTORS  
ON INDICATORS OF OPERATIONAL RELIABILITY  
KLAPANNO-SEDELNYH STEAM PNEUMOHYDRAULIC APPARATUS**

*This article discusses features of the rational choice of indicators for operational reliability valve-seated pairs of hydro pneumatic valves including the effect on their underlying destructive factors. There were systematized average statistical data on operational reliability of the most common types of valve seals hydro pneumatic valves.*

**Keywords:** *valve pneumatic hydraulic fittings, valve-saddle steam valving seal, drive spring, a resilient element, indicators of reliability, performance, sealing ability, resources, the linear load, the specific contact pressure seal, the coefficient of dynamic, destructive factors.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Muljukin, O.P. *Gidropnevmotoplivnyye agregaty i ih nadezhnost'*: Monografija [Tekst]/D.E. Chegoda-ev, O.P. Muljukin. – Kujbyshev: Kn. izd-vo, 1990. – 104 s.
2. Muljukin, O.P. *Gidropnevmotoplivnyye klapannyye agregaty s upravlyaemym kachestvom dinamichekikh processov*: Uchebno-spravochnoe posobie [Tekst]/ D.E. Chegodaev, O.P. Muljukin, A.N. Kirilin i dr. – Samara: SGAU, 2000. – 546 s.: il.
3. Dolotov, A.M. *Osnovy teorii i proektirovaniya uplotnenij pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov*: Uchebnoe posobie [Tekst]/A.M. Dolotov, P.M. Ogar, D.E. Chegodaeva. – M.: Izd-vo MAI, 2000. – 296 s.: il.
4. Dudin, M.P. *Osobennosti kompromissnogo vybora predel'nykh znachenij vyhodnykh parametrov bespruzhinnykh jelektropnevmoklapanov mobil'noy transportnoj tehniky* [Tekst]/O.E. Lavrus', M.P. Dudin, A.M. Dolotov//Vestnik SamGUPS. – Vypusk №1(11). – Samara: SamGUPS, 2011. – S. 145-149.
5. Dudin, M.P. *Vozmozhnosti i oblasti primeneniya metodov ocenki resursa uplotnitel'nykh zatvorov pnevmogidroarmatury* [Tekst]/A.V. Kovtunov, O.P. Muljukin, M.P. Dudin//Nauka i obrazovanie transportu: Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii (20-21 oktjabrja 2011 g., g. Orenburg). – Samara: Sam-GUPS, 2011 – s. 245-246.

**Muljukin Oleg Petrovich**

Samara state university of communication lines  
Doctor of technical sciences, professor, head of department “Engineering graphics”  
443063, Samara, 1<sup>st</sup> Bezymjanny per., 19  
Tel.: 8-963-916-06-34  
E-mail: om46@mail.ru

**Grigorieva Olga Jurievna**

State University - teaching - research - industrial complex  
Postgraduate  
Tel: (4862)43-48-90  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

**Dudin Mikhail Pavlovich**

Samara state university of communication lines  
Postgraduate  
443063, Samara, 1<sup>st</sup> Bezymjanny per., 19  
Tel.: 8-927-687-96-78  
E-mail: ripperhead@mail.ru

**Borzenkov Mikhail Ivanovich**

State University - teaching - research - industrial complex  
Candidate of technical sciences, Associate Professor of department "Avtoplast"  
Tel: (4862)43-48-90  
E-mail: bim5155@yandex.ru

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.9

А.В. КАТУНИН А.А. НАЙДЕНЬШЕВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВРЕЗАНИИ В ЗАГОТОВКУ**

*Приводится описание трехмерной конечно-элементной модели косоугольного резания, на основе которой выполнено исследование напряженного состояния режущей части инструмента при его врезании в заготовку в условиях прерывистой обработки.*

*Ключевые слова:* прерывистое точение; силы резания; DEFORM 3D.

Известно, что прочность и стойкость режущей части инструмента в условиях прерывистого резания подчиняется иным закономерностям, чем при не прерывном. Ряд авторов считает, что одной из причин этого являются переходные процессы, возникающие при врезании инструмента в заготовку и при выходе из неё [1-6].

Целью данной публикации является разработка трехмерной конечно-элементной модели косоугольного резания и исследование напряженного состояния режущей части инструмента при её врезании в заготовку.

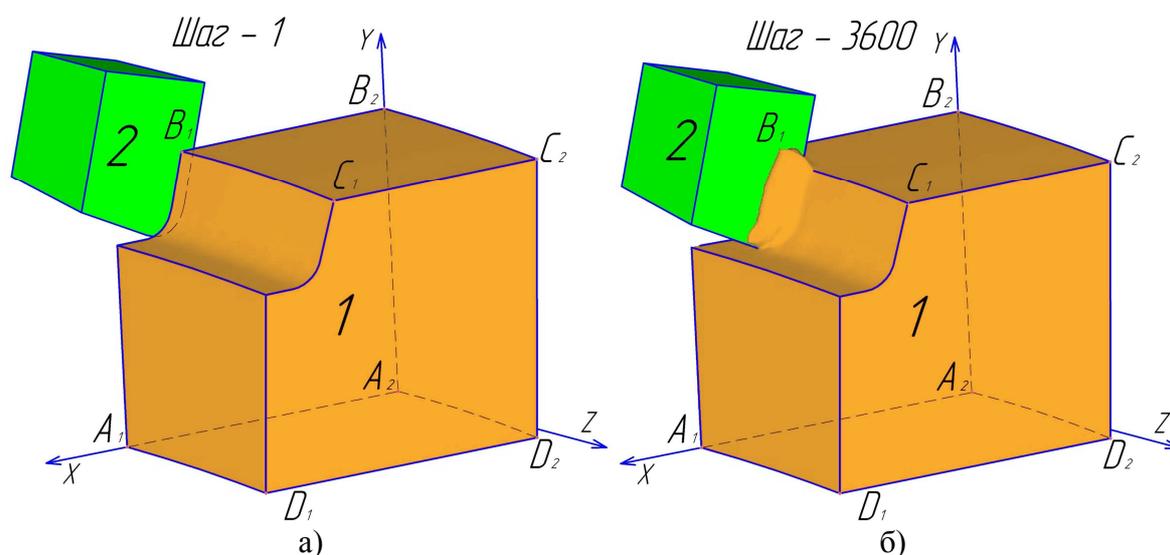
Существует множество программных средств использующих метод конечных элементов для решения задач в самых разных областях человеческой деятельности. В области металлообработки широкое применения получили программные продукты: ABAQUS, DEFORM 3D, LS DINA и другие. В данной работе применен программный комплекс DEFORM 3D, позволяющий моделировать процесс обработки металлов резанием.

Для реализации поставленной цели последовательно были:

- 1) разработаны трехмерные геометрические модели инструмента и заготовки в CAD среде, экспортируемые в DEFORM 3D;
- 2) сформированы исходные данные и граничные условия для моделирования врезания режущей части инструмента в заготовку;
- 3) проведено моделирование процесса врезания, при котором определялись силовые характеристики взаимодействия инструмента и заготовки, а также напряжения в зоне резания при врезании в заготовку;
- 4) сформированы исходные данные и граничные условия для расчета напряженного состояния режущей части инструмента;
- 5) выполнен расчет и анализ напряженного состояния режущей части инструмента при врезании в заготовку.

С целью уменьшения машинного времени при моделировании процесса врезания инструмента в заготовку рассматривались объекты «Пластина» и «Заготовка» (рис. 1).

Объект «Заготовка» представлял собой сегмент обрабатываемой детали радиусом 40 мм и длиной дуги 3,1 мм (рис. 1). Модель изотропного материала заготовки (сталь 45, зарубежный аналог – AISI-1045) упругопластическая: подчиняется закону Гука в упругом состоянии и условию текучести Мизеса – в пластическом состоянии. При моделировании учитывалась зависимость напряжения текучести обрабатываемого материала от совместного влияния деформации, скорости деформации и температуры.



**Рисунок 1 – Геометрические модели инструмента и заготовки при врезании**  
 а) положение начального контакта инструмента и заготовки (шаг моделирования №1);  
 б) формирование стружки (шаг моделирования №3600);  
 1 – «Заготовка»; 2 – «Пластина»

Сетка конечных элементов тетраэдральной формы объекта «Заготовка» генерировалась со следующими параметрами: минимальный размер стороны элемента 0,02 мм, максимальный – 0,2 мм.

Для сгущения элементов сетки в области резания вводились четыре окна плотности, с размерами сторон элементов 0,01 мм, 0,02 мм, 0,04 мм и 0,08 мм.

«Заготовка» фиксировалась в пространстве следующим образом (рис. 1): по оси X запрещалось перемещение узлов плоскости  $A_2B_2C_2D_2$ ; по оси Z - узлов плоскости  $A_2B_2C_2D_2$  и поверхности  $A_1D_1D_2A_2$ ; по оси Y - узлов поверхности  $A_1D_1D_2A_2$ .

Принимали, что конвективная теплоотдача объекта «Заготовка» в окружающую среду (воздух) происходит с коэффициентом равным  $0,04 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

Температура узлов плоскости  $A_2B_2C_2D_2$  и поверхности  $A_1D_1D_2A_2$  устанавливалась неизменной и равной  $20^\circ \text{С}$ .

Объект «Пластина» на этапе моделирования процесса врезания представлял собой фрагмент режущей части токарного резца, рассматриваемого как абсолютно жесткое тело. Материал объекта «Пластина» – твердый сплав Т5К10 со следующими теплофизическими характеристиками: коэффициент теплопроводности –  $62,802 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ; коэффициент удельной теплоемкости –  $0,052 \text{ ккал/кг}\cdot\text{К}$ ; коэффициент лучистости – 0,7.

Несмотря на то, что на этапе моделирования процесса врезания и определения напряжений в зоне резания объект «Пластина» упруго не деформировался, он также разбивался на конечные элементы. В области контакта инструмента с заготовкой сетка для объекта «Пластина» генерировалась с использованием трех окон плотности с размерами сторон элементов 0,01 мм 0,02 мм и 0,05 мм.

Процесс моделирования выполнялся при Лагранжевой формулировке сплошной среды с адаптивной регенерацией конечно-элементной сетки через каждые 20 шагов расчета. Шаг определялся по времени в 0,12 мкс.

Технологические параметры процесса прерывистого точения при моделировании: скорость резания - 100 м/мин, подача - 0,2 мм/об, глубина резания - 1мм. Геометрические элементы режущей части: передний угол  $\gamma=0^\circ$ ; угол наклона режущей кромки  $\lambda=0^\circ$ ; радиус при вершине  $r_b=0,4 \text{ мм}$ ; угол при вершине в плане  $\beta=80^\circ$ ; радиус округления режущей кромки  $r=0,02 \text{ мм}$ .; главный задний угол  $\alpha=8^\circ$ ; угол в плане  $\varphi=75^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_l=25^\circ$ .

Контактное взаимодействие объектов определялось законом трения и коэффициентом теплообмена. Для описания процессов трения на режущей части инструмента использован закон Зибеля [7]:

$$f = m \cdot \tau$$

где  $f$  – сила трения (Н);

$m$  – фактор трения равный 0,6;

$\tau$  – напряжение текучести при сдвиге (МПа).

Коэффициент теплообмена между инструментом и заготовкой принимался равным  $45 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

Начиная от момента первоначального контакта инструмента с заготовкой и до наступления установившегося резания с интервалом в один расчетный шаг вычислялись: силовые характеристики, напряжения и температура в зоне резания.

На рисунке 2 показан график изменения главной составляющей силы резания по оси Z в процессе врезания. В начальный период врезания сила резко возрастает до уровня 360 Н, а затем относительно медленно выходит на установившийся уровень.

Пошаговый расчет напряженного состояния режущей части инструмента выполнялся на основе результатов моделирования процесса врезания на соответствующем шаге. То есть, заимствовались силовые воздействия на каждый узел сетки объекта «Пластина» со стороны объекта «Заготовка». При этом объект «Пластина» представлялся как упругое тело со следующими механическими свойствами: модуль Юнга – 579000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,22, коэффициент теплового расширения –  $5,5 \cdot 10^{-6}$ .

Для уменьшения искажения результатов расчетов граничными условиями вводился объект «Опора», являющийся продолжением объекта «Пластина» (рис. 3). Такое построение модели режущей части инструмента позволяет снизить требования к вычислительной мощности используемого компьютера для генерации конечно-элементной сетки.

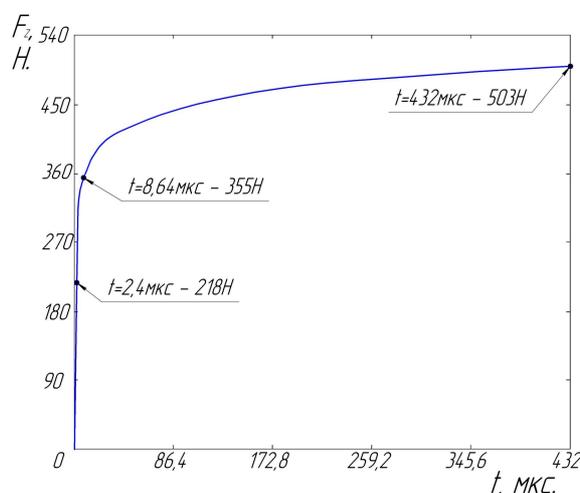


Рисунок 2 – График изменения главной составляющей силы резания по оси Z при врезании

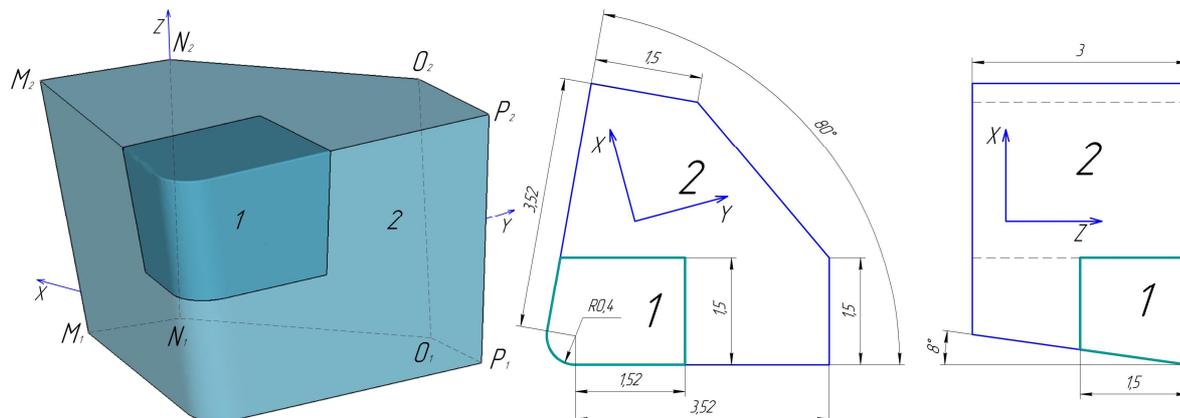


Рисунок 3 – Геометрическая модель режущей части инструмента для расчета напряженно деформированного состояния  
1 – объект «Пластина»; 2 – объект «Опора»

С целью представления объектов «Опора» и «Пластина» как единого тела, указывалась невозможность их разделения по плоскостям взаимного контакта. Материал объекта «Опора» задавался таким же, как и объекта «Пластина» (Т5К10).

Ограничения по перемещению в пространстве объекта «Опора»: по оси X и Y запрещалось перемещение узлов плоскостей  $M_1M_2N_1N_2$ ,  $N_1N_2O_1O_2$  и  $O_1O_2P_1P_2$ ; по оси Z - узлов поверхности  $M_1N_1O_1P_1$ . Для узлов указанных плоскостей температура задавалась постоянной и равной 20°C. По остальным свободным поверхностям теплообмен происходил с коэффициентом конвекции 0,04 Вт/м<sup>2</sup>·К.

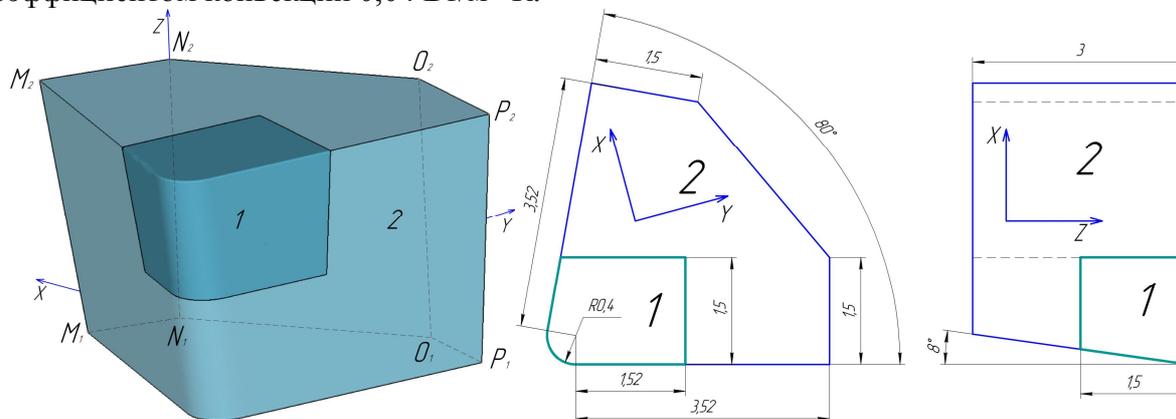


Рисунок 3 – Геометрическая модель режущей части инструмента для расчета напряженно деформированного состояния  
1 – объект «Пластина»; 2 – объект «Опора»

На каждом расчетном шаге моделирования определялись: эффективные напряжения, гидростатические напряжения, главные напряжения:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ .

После касания инструментом заготовки на передней поверхности режущей пластины, за пределами контакта со стружкой (с центром на расстоянии 0,34 мм от главной режущей кромки и – 0,3 мм от вспомогательной), начинал формироваться очаг растягивающих главных напряжений  $\sigma_1$  ( $t=2,4$  мкс; рис. 2, рис. 4). По мере нарастания силы резания, очаг увеличивался в размерах до момента времени  $t=8,64$  мкс (рис. 2, рис. 4), при этом величина напряжения  $\sigma_1$  также возрастала, достигая значения 670 МПа. В процессе дальнейшего внедрения инструмента в заготовку площадь очага напряжения  $\sigma_1$  начинает сокращаться, а величина напряжения – уменьшаться. К моменту выхода силы резания на установившийся уровень ( $t=432$  мкс) величина максимального значения  $\sigma_1$  в режущей части инструмента понижается до 470 МПа (рис. 2, рис. 4).

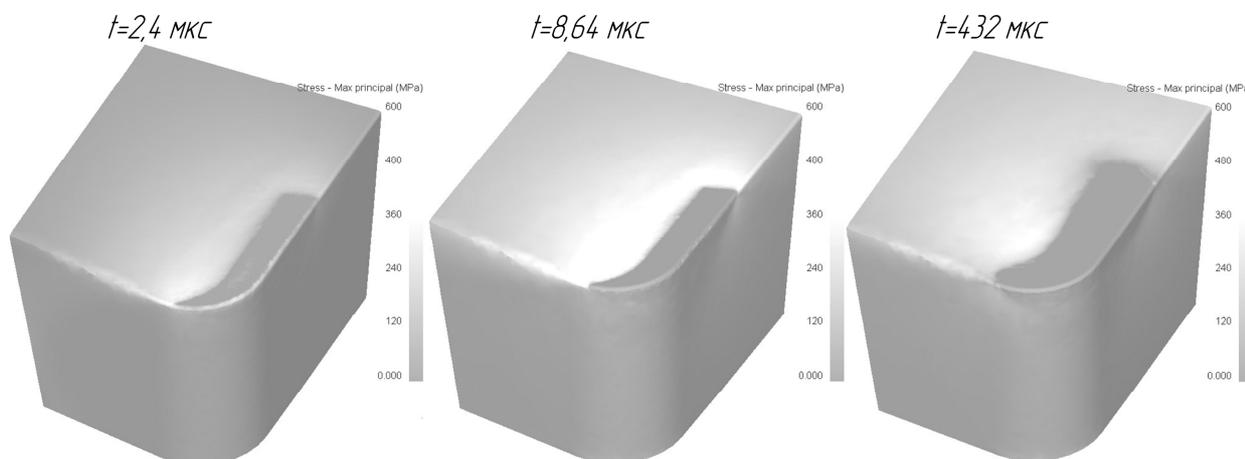


Рисунок 4 – Зоны действия максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  на передней поверхности режущей части инструмента

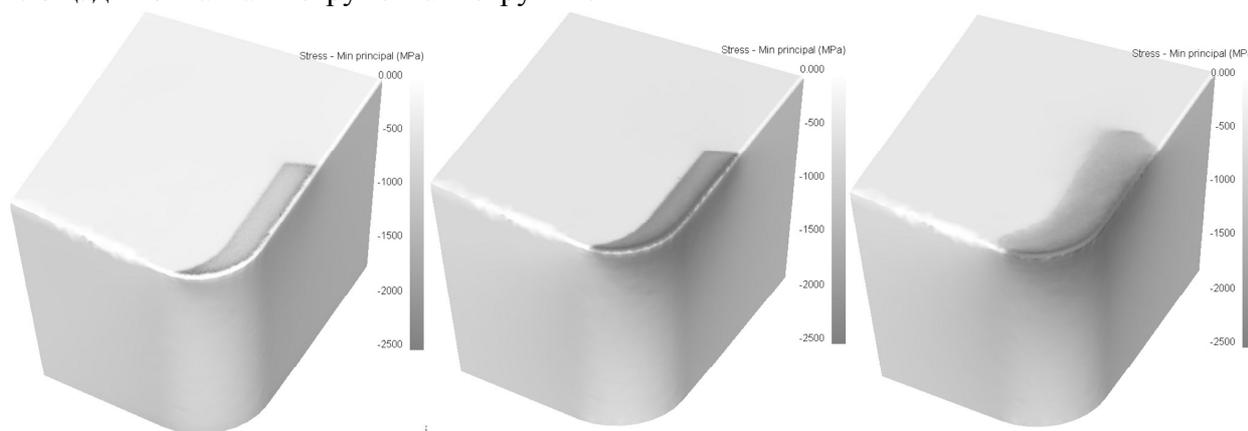
На рисунке 4 видно, что к моменту времени  $t = 2,4$  мкс (шаг моделирования №20) очаг положительных напряжений только обозначился; ко времени  $t = 8,64$  мкс (шаг моделирования №72) очаг положительных напряжений имеет максимальные размеры; к моменту времени  $t = 432$  мкс (шаг моделирования №3600) очаг напряжений уменьшился, а площадь его сократилась.

По мере врезания и формирования полной площадки контакта между инструментом и стружкой место действия максимального растягивающего напряжения смещается по передней поверхности, несколько отдаляясь от главной режущей кромки.

Темным тоном на передней поверхности пластины (рис. 4) показаны зоны действия сжимающих напряжений под стружкой.

Характер распределения положительных гидростатических напряжений подобен распределению главных напряжений  $\sigma_1$ . Также присутствует очаг максимальных значений напряжения на передней поверхности инструмента. К моменту времени  $t = 8,64$  мкс напряжения достигают максимального значения 250 МПа. По мере дальнейшего врезания инструмента в заготовку площадь очага начинает сокращаться, а величины напряжений – уменьшаться. При достижении главной составляющей силы резания установившегося уровня, наибольшее значение положительного гидростатического напряжения становится равным 175 МПа.

От момента касания с заготовкой в режущей части инструмента, в пределах площади контакта, действуют минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  (рис. 5). Их максимальные значения, достигающие к моменту установившегося резания 3000 МПа, наблюдаются на радиусной части режущей кромки. В ходе врезания, характер распределения  $\sigma_3$  не претерпевает заметных изменений; имеет место увеличение зоны их действия, связанное с увеличением площади контакта инструмента и стружки.



**Рисунок 5 – Зоны действия минимального главного напряжения  $\sigma_3$  на передней поверхности режущей части инструмента**

Представление напряженного состояния модели режущей части инструмента в эквивалентных напряжениях показывает, что область задней поверхности под скругленной вершиной резца является наиболее нагруженной.

Выводы.

1. Полученная трехмерная конечно-элементная модель косоугольного резания работоспособна и позволяет анализировать динамику изменения напряженного состояния режущей части инструмента при переходных процессах прерывистой обработки.

2. При врезании инструмента в заготовку вместе с увеличением силы резания происходит постоянное изменение напряженного состояния его режущей части.

3. На передней поверхности пластины наблюдается область повышенного значения растягивающего напряжения, величина, которого меняется по мере врезания инструмента в заготовку и принимает максимальное значение в момент времени  $t = 8,64$  мкс.

4. Величина максимальных растягивающих напряжений на передней поверхности режущей пластины в период врезания больше чем при установившемся резании.
5. Максимальные значения сжимающего напряжения  $\sigma_3$  наблюдались на радиусной части режущей кромки, которые достигали при принятых режимах обработки величины 3000 МПа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование работоспособности твердосплавных инструментов при прерывистом резании // Режущие инструменты: Экспресс информация. – 1981. - №36. – С.1-12.
2. Куклин, Л.Г. Усталостная прочность сплава Т5К10. Станки и инструмент / Л.Г. Куклин. – М.: Машиностроение, 1968. – 140с.
3. Силин, С.С. Теоретический анализ напряженного состояния режущей части инструмента при врезании в заготовку / С.С. Силин, В.В. Романов. – М., 1983.
4. Условия и время контакта при торцовом фрезеровании // Режущие инструменты: Экспресс информация. – 1979. - №1. – С.3-16.
5. Этин А.О. Влияние условий врезания торцевой фрезы на ее стойкость / А.О. Этин // Динамика процесса резания металлов. – М.: Mashgiz, 1953. – С.50-70.
6. Чандрасекаран, Х. К вопросу о неустановившихся напряжениях в режущих инструментах / Х. Чандрасекаран, Р. Нагараджан // Конструирование и технология машиностроения: Труды Американского общества инженеров-механиков. – М.: Мир, 1980. – Т. 202. – №2. – С.180-190.
7. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ, изд. – М.: Металлургия, 1982. – 312с.

**Катунин Александр Валентинович**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел. 89103062266  
E-mail: katunin@ostu.ru

**Найденышев Александр Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК», г. Орел  
Инженер  
Тел. 89202848382  
E-mail: a\_naidenysh@mail.ru

A.V. KATUNIN, A.A. NAYDENYSHEV

## INVESTIGATION OF STRESS STATE CUTTING PART OF THE TOOL AT CUTTING IN THE WORKPIECE

*Describes a three-dimensional finite element model oblique cutting based on which we have investigated the stress state of cutting part of the tool at its penetration into the workpiece in intermittent treatment.*

**Key words:** *intermittent turning, cutting forces; DEFORM 3D.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Issledovanie rabotosposobnosti tverdosplavnyh instrumentov pri preryvistom rezanii // Rezhuvie instrumenty: Jekspress informacija. – 1981. - №36. – S.1-12.
2. Kuklin, L.G. Ustalostnaja prochnost' splava T5K10. Stanki i instrument / L.G. Kuklin. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 140s.
3. Silin, S.S. Teoreticheskij analiz naprjazhennogo sostojanija rezhuvej chasti instrumenta pri vrezanii v zagotovku / S.S. Silin, V.V. Romanov. – M., 1983.
4. Uslovija i vremja kontakta pri torcovom frezerovanii // Rezhuvie instrumenty: Jekspress informacija. – 1979. - №1. – S.3-16.
5. Jetin A.O. Vlijanie uslovij vrezanija torcevoj frezy na ee stojkost' / A.O. Jetin // Dinamika pro-cessa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1953. – S.50-70.

6. Chandrasekaran, H. K voprosu o neustanovivshijsja naprjazhenijah v rezhuvih instrumentah / H. Chandrasekaran, R. Nagaradzhan // Konstruirovaniye i tehnologiya mashinostroeniya: Trudy Amerikanskogo obwestva inzhenerov-mehanikov. – M.: Mir, 1980. – T. 202. – №2. – S.180-190.

7. Grudev, A.P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem / A.P. Grudev, Ju. V. Sil'berg, V.T. Tilik. Sprav, izd. – M.: Metallurgiya, 1982. – 312s.

**Katunin Aleksandr Valentinovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor

Tel.: 8-910-306-22-66

E-mail: katunin@ostu.ru

**Naidenyshv Aleksandr Aleksandrovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Engineer

Tel.: 8-920-284-83-82

E-mail: a\_naidenysh@mail.ru

Е.А. КУДРЯШОВ, А.Ю. АЛТУХОВ, Е.И. ЯЦУН

## ЭФФЕКТИВНАЯ РАБОТА ИНСТРУМЕНТА ИЗ КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

*В данной статье изучены технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей. Изучена зависимость стойкости инструмента от расчетной точки его встречи с поверхностью заготовки и найдены оптимальные значения геометрии.*

**Ключевые слова:** детали машин, композит, точность, качество, прерывистое резание.

Одним из перспективных направлений металлообработки является использование лезвийных сверхтвердых инструментальных материалов на основе кубического нитрида бора (торговая марка композиты), которые благодаря своим уникальным физико-механическим и режущим свойствам позволяют решить проблему обработки самых сложных и точных поверхностей деталей машин и достигнуть высоких технико-экономических показателей.

Композиты сохраняют свою прочность при высоких температурах. Они не вступают в химическую реакцию с черными металлами на воздухе и при высокой температуре, что обуславливает их преимущества по сравнению с алмазами и другими традиционными инструментальными материалами. Несмотря на широкое разнообразие марки композитов не создают между собой конкуренции, успешно дополняют друг друга, имеют собственную область применения, определяемую условиями резания.

Можно определить основные области применения композитов: финишная обработка закаленных деталей, в том числе и при прерывистом резании; чистовое точение, как подготовительная операция, под последующую финишную обработку; чистовая обработка поверхностно закаленных материалов с мягкой сердцевиной.

Технология, существующая в нашей стране и за рубежом, дает возможность промышленного выпуска композитов в виде заготовок, размеры которых позволяют обеспечить их надежное крепление в любом лезвийном инструменте (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки). Однако, отсутствие стабильного качества режущих элементов предполагает необходимость их тщательного отбора, включая входной контроль и три вида испытаний: экспериментальные, контрольные и производственные, (см. рис. 1).

Дальнейшее применение режущих элементов осуществляется по двум направлениям: создание инструментов с механическим креплением цельных и многослойных круглых и многогранных пластин, а также с креплением поликристалла в переходной вставке, устанавливаемой в корпусе инструмента с заточкой под требуемую геометрию.

В металлообработке накоплен опыт исследования процессов чистовой и отделочной обработки деталей различной конструктивной сложности традиционными инструментальными материалами. Композиты при лезвийной обработке в условиях прерывистого резания известны намного меньше.

Более того, композиты из-за высокой хрупкости долгое время считались не перспективными для чистовой обработки прерывистых поверхностей деталей. Вопрос обеспечения эффективной работы инструмента из композита решался, в том числе, за счет применения у режущих элементов положительного угла наклона главной режущей кромки. Однако из-за ряда специфических явлений прерывистого резания это решение, равно как и другие, не способствует высокой работоспособности инструмента.

Авторами, в развитии теории и практики оптимального контакта режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки, на примере точения, предложен теоретический метод обеспечения заданной работоспособности инструментов из композитов, прошедший промышленную апробацию на операциях точения и растачивания, торцового

фрезерования, развертывания, скоростного нарезания резьб деталей из разнообразных конструкционных материалов, высокой конструктивной сложности.

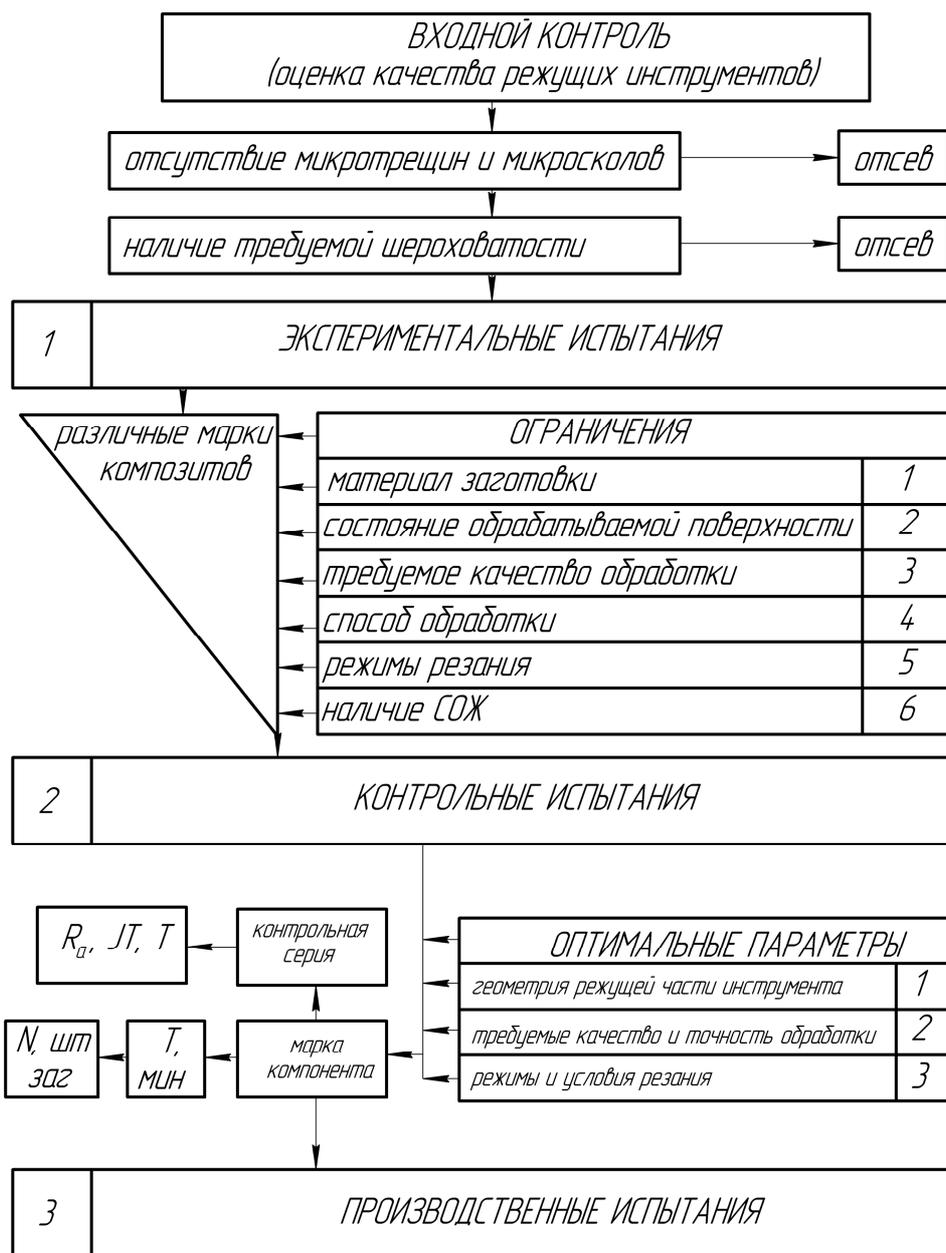


Рисунок 1 – Схема отбора режущих элементов из композитов

При точении заготовки  $d$  (мм), с продольным пазом создающим прерывистость обработки, шириной  $B$  (мм), при глубине резания  $t$  (мм), первоначальная встреча режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью может произойти в одном из девяти возможных положений:

1) точечный контакт в точках встречи  $S, T, U, V$ ; 2) линейный контакт режущих кромок в положениях  $ST, TU, UV, VS$ ; 3) плоскостной контакт, при котором передняя поверхность резца развернута относительно заготовки таким образом, чтобы встреча могла происходить по четырехугольнику  $STUV$ .

Очевидно, что последнее положение наиболее благоприятно с точки зрения стойкости инструмента (см. рис. 2).

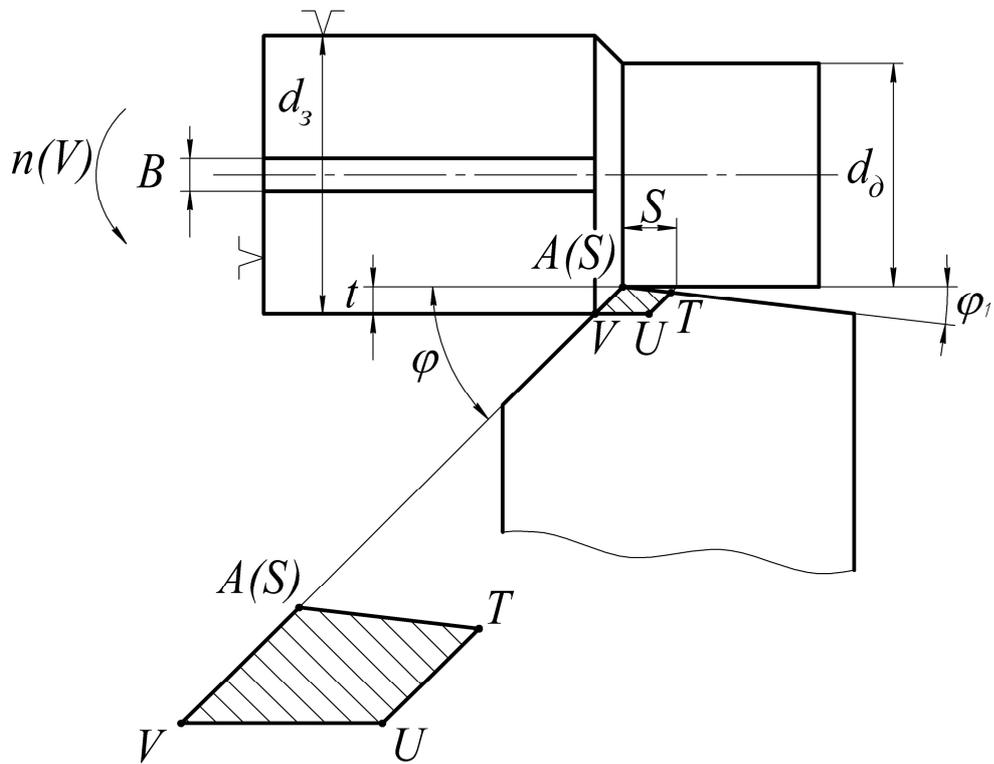


Рисунок 2 – Схема контакта

Продолжаем вращение детали вокруг оси симметрии ОХ до тех пор, пока вершина инструмента А не упрется в боковую поверхность паза в точке С.

Определим необходимый для этого угол поворота  $\beta$  (см. рис. 3).

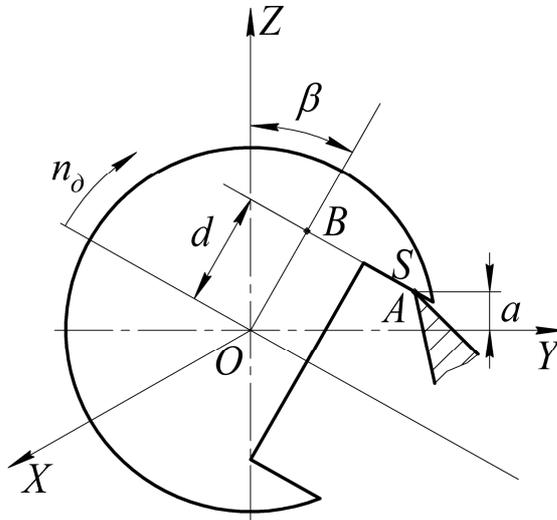


Рисунок 3 – Схема определения угла поворота

$$\beta = \left( \frac{\pi}{2} - \delta - \delta' \right) \quad (1)$$

Из прямоугольника COE, получим

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) = \operatorname{tg}\angle COE = \frac{F}{\sqrt{r^2 + a^2 - F^2}} \quad (2)$$

Поскольку  $CR=a$ ;  $OC=OK-t=r-t$  (см. рис. 3);  $OR=\sqrt{(r-t)^2 - a^2}$ , из прямоугольного треугольника  $COR$  следует

$$tg\delta' = tg\angle OCE = \frac{a}{\sqrt{(r-t)^2 - a^2}}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус заготовки;

$F=B/2$  половина ширины паза;

$a$  – смещение вершины инструмента.

$$\beta = \left( \frac{\pi}{2} - \delta - \delta' \right)$$

Так как

$$tg\beta = \frac{tg\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) - tg\delta'}{1 + tg\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)tg\delta'} = \frac{r \cdot F - a\sqrt{r^2 + a^2} - F^2}{r\sqrt{r^2 + a^2} - F^2 + a \cdot F}$$

$$\beta = arctg \frac{r \cdot F - a\sqrt{r^2 + a^2} - F^2}{r\sqrt{r^2 + a^2} - F^2 + a \cdot F} \quad (4)$$

откуда

Для соблюдения положения полного прилегания передней поверхности инструмента к боковой поверхности паза ( $STUV$ ) необходимо и достаточно чтобы передний угол резца в осевом направлении заготовки  $\gamma_{oc}$  равнялся углу поворота  $\beta$  ( $\gamma_{oc}=\gamma_{омакс}=\beta$ ), а в радиальном направлении был равен нулю ( $\gamma_{радмакс}=0$ ).

Осевой передний угол определяется

$$tg\gamma_{oc} = tg\gamma \cdot \cos\varphi - tg\alpha \cdot \sin\varphi, \quad (5)$$

Величина радиального переднего угла находится

$$tg\gamma_{рад} = tg\gamma \cdot \sin\varphi + tg\alpha \cdot \cos\varphi, \quad (6)$$

Для получения максимально возможных углов  $\alpha$  и  $\gamma$  воспользуемся известными формулами, описывающими связь между углами резца:

$$tg\gamma = tg\gamma_{oc} \cdot \cos\varphi + tg\gamma_{рад} \cdot \sin\varphi, \quad (7)$$

$$tg\lambda = tg\gamma_{рад} \cdot \cos\varphi - tg\gamma_{oc} \cdot \sin\varphi, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки;

$\gamma$  – передний угол;

$\varphi$  – главный угол резца в плане.

Подставив значения  $\gamma_{омакс}$  и  $\gamma_{радмакс}$  в зависимости (7-8), найдем критические значения углов резца

$$tg\gamma_{кр} = tg\beta \cdot \cos\varphi, \quad (9)$$

$$tg\lambda_{кр} = -tg\beta \cdot \sin\varphi, \quad (10)$$

Для дальнейшего анализа в качестве отправной точки выберем найденное особое положение передней поверхности резца. Сохраняя значение  $\gamma_{омакс}=\gamma_{радмакс}=0$ , будем изменять  $\gamma_{oc}$

Если взять  $\gamma_{oc}=\gamma_{омакс}$  касание заготовки и резца будет происходить по прямой  $UV$  (см. рис. 5) и при этом углы  $\lambda$  и  $\gamma$  удовлетворяют условиям:

$$tg\gamma = tg\gamma_{oc} \cdot \cos\varphi, \quad (11)$$

$$tg\lambda = -tg\gamma_{oc} \cdot \sin\varphi, \quad (12)$$

Выделим из формулы (11) угол  $\gamma_{oc}$  и подставив его значение в формулу (12), получим

$$tg\lambda = -\frac{tg\gamma \cdot \sin\varphi}{\cos\varphi} = -tg\gamma \cdot tg\varphi, \quad (13)$$

Если теперь из особого положения изменять угол  $\gamma$  резца, сохраняя значение  $\lambda = \lambda_{кр}$ , то передняя поверхность резца будет поворачиваться вокруг прямой SV (при  $\gamma > \gamma_{кр}$ ) или вокруг прямой TU (при  $\gamma < \gamma_{кр}$ ), (см. рис. 4).

Полученные результаты можно представить наглядно на плоскости, если на одной оси координат отложить значение  $tg\lambda$ , а на другой значение  $tg\gamma$ , (см. рис. 4).

В этой системе координат все критические сочетания параметров геометрии резца располагаются по прямым линиям, выходящим из одной точки P, соответствующей критическим значениям углов  $\gamma_{кр}$  и  $\lambda_{кр}$ .

Полученные линии делят всю плоскость  $tg\lambda - tg\gamma$  на четыре части с общей вершиной в точке P. Каждая из линий соответствует определенному касанию заготовки и передней поверхности резца в одной из точек S, T, V, U.

Результаты испытаний, промышленное внедрение показали высокую эффективность принятых технологических решений.

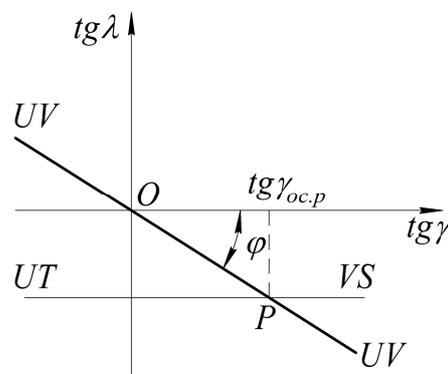


Рисунок 4 – Схема расположения критических углов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов, Е.А. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Обработка металлов. – Новосибирск, 2009. – №4(45). – С. 3-8.
2. Кудряшов, Е.А. Зависимость качества обработки от геометрии и условий контакта резца с конструктивно сложной поверхностью заготовки / Е.А. Кудряшов // Известия КурскГТУ. – Курск, 2010. – №2(31). – С. 77-82.
3. Кудряшов, Е.А. Эффективность инструментального материала композит 10 при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей машин / Е.А. Кудряшов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. – №2(26). – С. 245-247.
4. Кудряшов, Е.А. Количественная оценка процессов в обработанном композитом поверхностном слое деталей машин / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №12(72). Волгоград: ВолГТУ, 2010. – С. 10-15.
5. Кудряшов, Е.А. Технологические особенности лезвийной обработки режущими инструментами оснащёнными композитами / Е.А. Кудряшов, Е.В. Павлов, Е.И. Яцун // Современные тенденции в технологиях и конструкциях металлообрабатывающего оборудования: Материалы межд. станкостроительного форума: - М.: ЦВК Экспоцентр, 2011. – С. 74-76.

### Кудряшов Евгений Алексеевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор кафедры МТиО, первый проректор - проректор по учебной работе

Телефон (факс): 8(4712) 50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

### Яцун Елена Ивановна

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой МТиО

Телефон (факс): 8(4712) 50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

### Алтухов Александр Юрьевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Аспирант

Телефон (факс): 8(4712) 50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

**EFFECTIVE WORK OF THE TOOL FROM THE COMPOSITE IN  
CONDITIONS OF FALTERING CUTTING**

*This article explored the technological advantages of the tool material composite processing structurally complex surface parts. The dependence of the tool life of the target point of his meeting with the surface of the work-piece and found the optimal values of the geometry.*

**Keywords:** machine parts, composite, precision, quality, intermittent cuts.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kudrjashov, E.A. Tehnologicheskij klassifikator detalej i poverhnostej, podlezhawih obrabotke rezaniem / E.A. Kudrjashov, A.Ju. Altuhov, D.Ju. Lunin // Obrabotka metallov. – Novosibirsk, 2009. – №4(45). – С. 3-8.
2. Kudrjashov, E.A. Zavisimost' kachestva obrabotki ot geometrii i uslovij kontakta rezca s konstruk-tivno slozhnoj poverhnost'ju zagotovki / E.A. Kudrjashov // Izvestija KurskGTU. – Kursk, 2010. – №2(31). – S. 77-82.
3. Kudrjashov, E.A. Jeffektivnost' instrumental'nogo materiala kompozit 10 pri obrabotke konstruk-tivno slozhnyh poverhnostej detalej mashin / E.A. Kudrjashov // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. Nauchnyj zhurnal. – Irkutsk: IrGUPS, 2010. – №2(26). – S. 245-247.
4. Kudrjashov, E.A. Kolichestvennaja ocenka processov v obrabotannom kompozitom poverhnostnom sloe detalej mashin / E.A. Kudrjashov, A.Ju. Altuhov, D.Ju. Lunin // Izvestija VolGTU: mezhvuz. sb. nauch. st. №12(72). Volgograd: VolGTU, 2010. – S. 10-15.
5. Kudrjashov, E.A. Tehnologicheskie osobennosti lezviyjnoj obrabotki rezhuwimi instrumentami os-nawennymi kompozitami / E.A. Kudrjashov, E.V. Pavlov, E.I. Jacun // Sovremennye tendencii v tehnologijah i konstrukcijah metalloobrabatyvajuwego oborudovaniya: Materialy mezhd. stankostroitel'nogo foruma: - M.: CVK Jekspocentr, 2011. – S. 74-76.

**Kudryashov Eugeny Alekseevich**

Southwest State University, Kursk

Doctor of technical science, professor of department “Machine-building Technology and Equipment”, first pro-rector – pro-rector for academic affairs

Tel/Fax 8-4712-50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

**Yatsun Elena Ivanovna**

Southwest State University, Kursk

Candidate of technical science, associate professor, head of department “Machine-building Technology and Equipment”

Tel/Fax 8-4712-50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

**Altuhov Aleksandr Yurievich**

Southwest State University, Kursk

Post-graduate student

Tel/Fax 8-4712-50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

## **ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 378.124.082

Г.В. БАРСУКОВ, Е.М. РОДИОНОВА, Е.Ю. СТЕПАНОВА

### **ГЕНЕРИРОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ИДЕЙ, КАК ЭЛЕМЕНТ ИННОВАЦИОННО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ В ВУЗЕ**

*Авторами статьи рассматриваются особенности этапа генерирования идей при создании нового инновационного продукта научно-педагогическими работниками в вузе.*

*Ключевые слова:* инновации, инноваторы, научная продуктивность, личность, творческая активность.

Инновационная деятельность научно-педагогического работника в вузе подразумевает генерирование идей и их последующее преобразование в коммерческую продукцию. Конечно, для того чтобы получить конечный инновационный продукт требуется участие не одного человека, но ученый в вузе должен обладать богатым воображением, которое позволяет решать актуальные проблемы в науке и технике.

Для того чтобы стать источником идей применяют различные методы их генерации. Это могут быть простые методы, основанные на использовании ощущений, образов, мыслей подталкивающих к генерации новых идей. Более сложные методы генерирования идей основаны на научно-обоснованных правилах и закономерностях, направляющих ход мыслей в нужное русло. Понятно, что каждый ученый индивидуален и у него есть свои особенности мышления, поэтому он использует те способы и приемы, которые служат катализатором идей.

Генерирование идей научно-педагогическим работником в нашем понимании одна из характеристик продукции ученого в вузе, его работы, его деятельности. Когда мы говорим, что ученый является генератором идей, что его работа отвечает креативности мышления, это означает, что результаты его работы оцениваются и как оригинальные, и как полезные. Оригинальность идеи и работы это ее отличие от обычных решений в данной области, их необычность. Но недостаточно выдвигать необычные идеи, многие люди это могут делать. Вопрос в том, насколько эти оригинальные идеи позволяют решить возникшие проблемы, т.е. насколько эта идея полезна.

Компания Google в сентябре 2008 года выделила 10 млн долл. на финансирование конкурса идей, направленных на то, чтобы изменить мир. Поступило более 150 тыс. предложений на 25 языках, к рассмотрению которых пришлось привлечь более 3 тыс. сотрудников компании. После конкурса планируется провести опрос заинтересованных специалистов и групп, получив от них предложения по воплощению указанных идей в жизнь.

Следует подчеркнуть, что ученый или любой другой педагогический работник в вузе может быть высокопродуктивным, работая рутинным путем. Но, работая высокопродуктивно, активно публикуя свои результаты, он может не являться генератором новых необычных идей, отличающихся оригинальностью и полезностью.

Таким образом, научно-педагогических работников по-своим способностям следует разделять на потенциальных генераторов идей и внедряющих свои идеи в конечную продукцию. Человек может обладать высокими способностями к генерированию идей, но фактически не использовать их. Эта одна из многих способностей, которыми может обладать человек. Ученый может обладать лишь небольшими способностями к генерированию новых идей, но, тем не менее, быть высокопродуктивным и высоко цениться своими коллегами, если он использует другие свои способности.

Анализ биографий выдающихся ученых говорит о том, что уже в раннем возрасте будущие гении намного превосходили сверстников по уровню интеллекта (имели высокий коэффициент интеллектуальности). В то же время, умеренно высокий уровень интеллектуальных способностей, соединенный с необыкновенным упорством, позволяет достичь большего, чем самые блестящие способности, соединенные с несколько меньшей настойчивостью.

Швейцарский изобретатель Жорж де Местраль изобрел застежку-«липучку». Однажды к его одежде пристали головки репейника. Стараясь отодрать их, де Местраль заинтересовался, почему они так крепко прилипают к ткани. Много лет он настойчиво пытался найти способ крепления подобных крючочков к ленте из ткани. В конце концов, через 7 лет он получил патент на застежки-липучки [1].

Многочисленные исследования биографий ученых, связи между потенциальными возможностями, уровнем интеллекта доказывают отсутствие устойчивой связи с достижениями в науке. Выявленные с помощью тестов в раннем возрасте потенциальные творческие способности не являются прогностическими в отношении будущих достижений в науке. Ни один из обследованных школьников с высоким уровнем интеллекта не оставил заметного вклада в выбранной сфере деятельности. Исследование творческих способностей ученых, уже имеющих достижения в науке, показали зависимость между уровнем креативности и реальными достижениями. С другой стороны после высокой оценки, полученной в тестах творческих способностей, не гарантирует эффективной деятельности в науке.

Во всех случаях, какой бы оригинальной не была идея, она всегда требует от автора дальнейших действий: продать, реализовать самостоятельно или продать и участвовать в ее реализации.

Считается, что рождение новых идей - это случайный процесс и лишь немногие ученые, более одаренные, способны генерировать их. Появление новой идеи нельзя связывать только с долгой и продолжительной работой в определенном научном направлении. Немало ученых долго и продуктивно работают, и следовало бы ожидать выработку новой идеи. Это было бы ожидаемым окончанием проведенной работы, затраченных средств и сил, но, к сожалению, получить только таким образом ожидаемый результат невозможно.

Идея решения проблемы приходит неожиданно, как результат озарения и предсказать момент ее зарождения невозможно. Однажды во время грозы, наблюдая разряды молний, Н. Тесла приходит к идее передачи таким же способом электрической энергии [2].

С другой стороны появление новой идеи нельзя полностью связывать лишь с волей случая. Пассивный метод получения идей следует связывать с особым складом ума и методом мышления. История изобретательства имеет много примеров, когда люди способны выработать сотни новых идей, например, Эдисон. Как правило, знаменитые изобретатели и ученые предлагают не одну, а целый ряд новых идей.

Другое дело, что на проработку и внедрение новой идеи могут уйти годы кропотливой работы. Однако годы такой работы могут растерять полезность идеи и потребовать ее усовершенствование или обновление. Поэтому полезно работать в научном коллективе, в котором есть блестящие ученые, способные добросовестно работать, обладающие необходимыми навыками, опытом и знаниями научной работы, но в тоже время лишенные дара выдвигать новые идеи.

Долгие годы работы над одной научной проблемой позволяют накопить много новой научной информации, как теоретической, так и экспериментальной. На основе собранной информации ученый может провести переоценку старых идей и выдвижение новых. Однако, как правило, ученый ищет объяснение новой полученной информации об исследуемом объекте с привлечением общепринятых и известных теорий, что снижает возможность опровержения полученных другими учеными доказательств и выдвижение новых идей.

Мнимые числа с XVI века считались бесполезными. Открыл мнимые числа в 1545 году итальянский математик Дж. Кардано. Сам первооткрыватель долго сомневался в своем открытии, не находя им ни практического, ни геометрического смысла. Признали их только почти через три столетия – на границе XVIII – XIX веков, когда математики нашли связи

между ними и такой важной константой, как  $\pi$ . А сегодня благодаря этим числам ученые могут объяснить самые странные аспекты квантовой механики [3].

Поэтому на генерирование идей оказывает влияние окружающая среда. Предположим, что ученому пришла в голову новая идея, противоположная общепринятым подходам. Тогда, он должен иметь волю и желание ознакомить с ней других. Однако сообщение о новой идеи связано с риском, так как она противоречит общепринятым представлениям или, если эта работа ведется на кафедре, в научной школе ставит под сомнение работу всего коллектива или руководителя. Таким образом, возникает ситуация, когда по различным причинам автор идеи не желает высказывать новые идеи, какими бы потенциально полезными они не были бы. Когда Фарадей продемонстрировал премьер-министру Англии опыт, иллюстрирующий электромагнитную индукцию, тот насмешливо спросил у изобретателя: «Что толку от вашего электричества?»

Таким образом, устойчивая позиция ученого, отстаивание своих взглядов не зависимо от обстоятельств, одна из главных черт личности ученого, которая является предпосылкой творческой продуктивности, генерирования новых, оригинальных идей.

Исследуя психологические особенности личности ученого, М. Киртон пришел к выводу, что часть ученых являются новаторами, обладающими высокими способностями к генерированию идей, способные противопоставить свое мнение научной общественности, а другая часть адапторы - это ученые, способные довести идею до логического завершения, они владеют в совершенстве техникой и методикой научной работы [4].

Не мало, важным является и статус ученого, его репутация, служебное положение. Иногда сообщение ученого о новой идеи не принимается его коллегами. Для того чтобы идеи воспринимались всерьез, ученый должен иметь возможность довести свои идеи до руководителя, который стоит выше его по служебной иерархии. Как видно, процесс использования новых идей зависит от коммуникационных аспектов в научном коллективе.

По мнению французского социолога Жана Габриеля, деятельность немногих новаторов и изобретенные ими новшества являются основным двигателем социальной эволюции, способствуя развитию общества [5]. Следует при этом учитывать, что наибольшее распространение получают не любые «изобретения», а те, которые в целом вписываются в уже существующую культуру и не сильно противоречат ее основам.

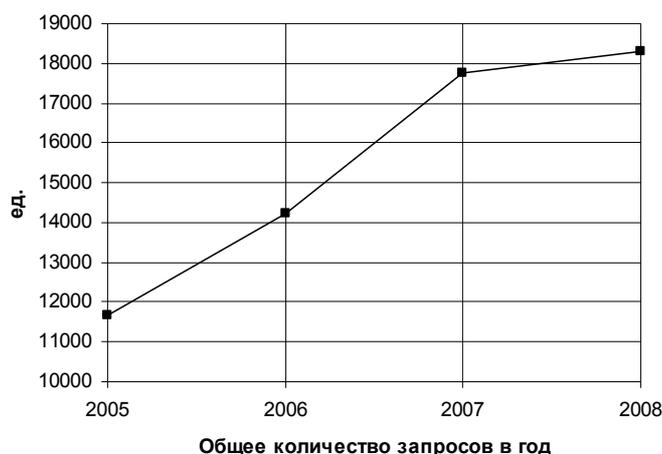
Таким образом, потенциально новая идея может оказаться бесполезной, даже если автор готов и способен довести свою идею до других. Внутренняя атмосфера в научном коллективе может быть настолько закрытой и негибкой, что новая идея не будет восприниматься. Например, после нескольких лет работы в рамках исследовательского проекта могут быть четко определены его методы и цели. Поэтому вся научная деятельность должна осуществляться в рамках заранее определенного направления для достижения поставленных целей. Ни один руководитель проекта не будет поддерживать рискованные идеи, в особенности потому, что ему приходится управлять чужими капиталами. Он предпочитает, чтобы любой исследовательский проект гарантировал определенный результат, который позволил бы составить отчет о проделанной работе и подсчитать расходы и доходы. Такое положение не позволяет генерировать новые идеи, касающиеся этой темы. Таким образом, гибкость окружающей среды ученого позволяет воплощать в жизнь новые идеи.

Поэтому роль руководителя в научном коллективе является основополагающей в стимулировании процесса генерирования новых идей. Это налагает определенные требования к методам управления научной деятельностью, что в последнее время усложняет и изменяет традиционные функции руководителя. Главным требованием к руководителю является умение создать внутреннюю атмосферу в коллективе, направленную на внутреннюю мотивацию ученых к генерированию новых идей.

Руководителю научного коллектива следует учитывать, что у ученого внутренняя мотивация преобладает над внешней. Ученый стремиться реализовать свои внутренние побуждения к деятельности, получить удовольствие от самого процесса работы, от возможности выдвигать новые идеи и добиваться успеха.

Для ученого очень важным является получить признание среди коллег, иметь авторитет в научном обществе. Это заставляет ученого постоянно поддерживать свою мозговую активность и выдвигать новые идеи решения проблем. Исследования психологии ученых говорят о том, что если он стремиться на получение внешней оценки своего труда, получение премии, награды, то эффективность его работы снижается, она не имеет новизны и не обладает оригинальностью решений [6].

Генерирование идей ученым вполне может осуществляться без получения новой информации. В мире накоплен огромный объем научной информации, полученной другими учеными. В Российской Федерации наряду с классическими базами данных, в основном библиографическими и реферативными, доминировавшими в информационном обслуживании науки до середины 1990-х гг., научные учреждения и службы научно-технической информации стали создавать самые разнообразные коллекции научных документов и данных, рассчитанных как на общее, так и локальное использование (рис. 1).



*Рисунок 1 – Динамика использования полнотекстовых баз данных по отечественным изобретениям и полезным моделям*

Просмотрев имеющуюся информацию, ученый может найти новый и интересный метод ее обобщения. То есть идея будет заключаться в новом подходе к информации доступной каждому, интерпретации ее по-новому.

Например, фотоэффект был открыт еще Генрихом Герцем, Гальваксом и другими физиками в восьмидесятих годах прошлого века. И только Столетов объяснил закономерную связь фототока со светом, его вызывающим. Эту закономерность невозможно было объяснить по законам классической физики. Фотоэффект противоречил этим законам. В течение почти двух десятилетий он оставался загадочным явлением.

Обстоятельное изучение баланса рабочего времени химика-исследователя, проведенное в США, показало, что на информационную деятельность тратиться до 61,4 % рабочего времени. Таким образом, успех генерирования новых идей в науке сейчас зависит от того, как преодолевается ученым информационный барьер.

Не всегда генерирование идей тесно связано с полученными новыми техническими решениями и научными теориями. Соответствующие технические знания позволяют создать новшество, но новая идея его использования и применения не всегда приходит автоматически. Поэтому одних только технических знаний для генерирования новых не достаточно. Так, в 1854 году немецкий военный врач Вильгельм Зинстеден вплотную приблизился к созданию аккумулятора, однако он не сделал никаких практических выводов из своего наблюдения [7]. Только в начале XX века Томас Эдисон сделал аккумулятор приспособленным для нужд транспорта. Этот пример показывает, что одних лишь технических знаний, информации о наблюдаемых явлениях еще не достаточно, чтобы выработать новую идею.

Таким образом, генераторами идей являются ученые, которые:

- не воспринимают занятие научными исследованиями, как рутину, а работают с удовольствием;
- являются специалистами и экспертами в своей области, имеют признание и авторитет в научном обществе;
- опираются не только на талант и творческие способности, но и много работают для достижения поставленной цели.

Выдвинутая новая идея не охраняется, как таковая. Ее обнаружение может привести к потере приоритета в исследовании. Это связано с тем, что сама идея не охраняется никакими правовыми документами. Для того, чтобы защитить выдвинутую новую идею от использования другими, необходимо ее проработать и довести до исполнения в виде чертежей, технической документации, до понимания как можно осуществить ее, исходя из современного развития уровня техники. С этого момента права на идею можно защитить авторским правом или патентным.

Получение патента является важнейшим элементов научно-инновационной деятельности ученого, так как она обеспечивает эффективную защиту результатов интеллектуальной деятельности от недобросовестной конкуренции.

Ниже приводятся данные о подаче в Роспатент заявок на объекты промышленной собственности в целом по России за 2007 – 2009 гг. (таблица 1) [8].

Таблица 1 – Динамика подачи заявок на объекты промышленной собственности по России

Вид объекта	2007	2008	2009
Изобретения	39439	41849	38564
Полезные модели	10075	10995	11153
Промышленные образцы	4823	4711	3740
Товарные знаки и знаки обслуживания	57262	57112	50107
Всего	111599	114667	103564

Спрос со стороны российского производителя на новые разработки остается низким и не оказывает стимулирующего влияния на изобретательскую и инновационную деятельность. Кроме того, в России неразвита инфраструктура инновационного ранка, позволяющая эффективно осваивать прогрессивные патенты и лицензии. В настоящее время отечественные предприятия предпочитают покупать зарубежные технологии и оборудование, таким образом удовлетворяя свой спрос на инновации.

В своем докладе руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Б.П. Симонов обозначил проблемы охраны результатов научно-технической деятельности в сфере изобретательства в виде двух аспектов:

- невысокого уровня показателей изобретательской активности в среднем по стране (в настоящее время в Российской Федерации показатель количества поданных заявок на изобретения национальных заявителей на 10000 жителей составляет 2,1, в Японии 27,7, в США – 4,5, Германии – 5,5);
- низкого уровня практического использования результатов интеллектуальной деятельности.

В характеристиках изобретательской и инновационной деятельности в Российской Федерации находит отражение та роль, которую Россия играет в настоящее время в процессах международного технологического обмена, а также уровень ее вовлечения в мировые экономические связи. Эти аспекты изобретательской деятельности могут отражаться в пока-

зателях патентования иностранных разработок в России, количество которых неизменно растет год от года и увеличилось почти в три раза по сравнению с 2002 годом.

Уровень же представления российских разработок на зарубежных патентных рынках недостаточен и не соответствует накопленному научно-техническому потенциалу: ежегодно за рубежом осуществляется патентование всего лишь нескольких сотен российских изобретений.

Таким образом, продуктивность генерирования новых технических идей научно-педагогическими работниками в вузе можно повысить, если работа над инновационным проектом будет проводиться в команде по данному направлению в течение сравнительно короткого времени, а координация деятельности в такой команде не очень сильна и ученые могут влиять на лиц, принимающих управленческие решения. Иными словами количество новых идей повышается при работе над новыми темами при свободном общении.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хансен, М.В. Расшифруйте код миллионера [Текст] / М.В. Хансен – М.: Попурри, 2006. – 416 с.
2. Сейфер, М. Никола Тесла. Повелитель вселенной [Текст] / М. Сейфер. – М.: Эксмо, Яуза, 2007 г.
3. Гутер, Р.С. Джироламо Кардано [Текст] / Р.С. Гутер, Ю.Л. Полунов. - М.: ЭНАС, 2010. – 256 с.
4. Аллаhverдян, А.Г. Психология науки [Текст]: учебное пособие / А.Г. Аллаhverдян, Г.Ю. Мошкова, А.В. Юревич, М.Г. Ярошевский. - М.: Московский психолого-социальный институт: Флинта, 1998. - 312 с.
5. История социологии в Западной Европе и США [Текст]: учебник для вузов / Ответственный редактор - академик РАН Г.В. Осипов. - М.: НОРМА, 2001. — 576 с.
6. Пельц, Д. Ученые в организациях [Текст] / Д. Пельц, Ф. Эндрюс. – М.: Прогресс, 1973. – 471 с.
7. Рыжов, К.В. Сто великих изобретений [Текст] / К.В. Рыжов – М.: Вече, 2006. -528 с.
8. Отчет о деятельности Роспатента за 2010 год [Электронный ресурс]. - URL: / <http://www.rupto.ru/about/sod/otch/otch2010/sod.htm>.

#### **Барсуков Геннадий Валерьевич**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Начальник Управления инновационных проектов и производств  
Тел. (4862) 419818  
e-mail: upk@ostu.ru

#### **Родионова Екатерина Михайловна**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Начальник отдела «Аспирантура, докторантура и диссертационные советы»  
Тел. (4862) 419818  
e-mail: upk@ostu.ru

#### **Степанова Елена Юрьевна**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Старший научный сотрудник отдела фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ  
Тел. (4862) 413295  
e-mail: unir@ostu.ru

---

G.V. BARSUKOV, E.M. RODIONOVA, E.J. STEPANOVA

## **GENERATION OF NEW TECHNICAL IDEAS, AS AN ELEMENT INNOVATIVE RESEARCH ACTIVITY RESEARCHERS AND TEACHERS IN HIGH SCHOOL**

*The authors of the article features step of generating ideas for creating a new innovative product research and teaching staff at the university.*

**Keywords:** *innovation, innovators, research productivity, identity, creative activity.*

BIBLIOGRAPHY

1. Hansen, M.V. Rasshifrujte kod millionera [Tekst] / M.V. Hansen – M.: Popurri, 2006. – 416 s.
2. Sejfer, M. Nikola Tesla. Povelitel' vselennoj [Tekst] / M. Sejfer. – M.: Jeksmo, Jauza, 2007 g.
3. Guter, R.S. Dzhirolamo Kardano [Tekst] / R.S. Guter, Ju.L. Polunov. - M.: JeNAS, 2010. – 256 s.
4. Allahverdjan, A.G. Psihologija nauki [Tekst]: uchebnoe posobie / A.G. Allahverdjan, G.Ju. Moshkova, A.V. Jurevich, M.G. Jaroshevskij. - M.: Moskovskij psihologo-social'nyj institut: Flinta, 1998. - 312 s.
5. Istorija sociologii v Zapadnoj Evrope i SShA [Tekst]: uchebnik dlja vuzov / Otvetstvennyj redaktor - akademik RAN G.V. Osipov. - M.: NORMA, 2001. — 576 s.
6. Pel'c, D. Uchenye v organizacijah [Tekst] / D. Pel'c, F. Jendrjus. – M.: Progress, 1973. – 471 s.
7. Ryzhov, K.V. Sto velikih izobretenij [Tekst] / K.V. Ryzhov – M.: Veche, 2006. -528 s.
8. Otchet o dejatel'nosti Rospatenta za 2010 god [Elektronnyj resurs]. - URL: / <http://www.rupto.ru/about/sod/otch/otch2010/sod.htm>.

**Barsukov Gennadiy Valerievich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Chief of department “Innovative projects and production”  
Tel.: 4862-41-98-18  
E-mail: [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)

**Rodionova Ekaterina Mihailovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Chief of department “Post-graduate education, doctoral studies and dissertation committee”  
Tel.: 4862-41-98-18  
E-mail: [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)

**Stepanova Elena Yurievna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Senior scientific worker of department “Fundamental and applied research and development works”  
Tel.: 84862-41-32-95  
E-mail: [unir@ostu.ru](mailto:unir@ostu.ru)

А.В. МОРОЗОВА

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТА ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

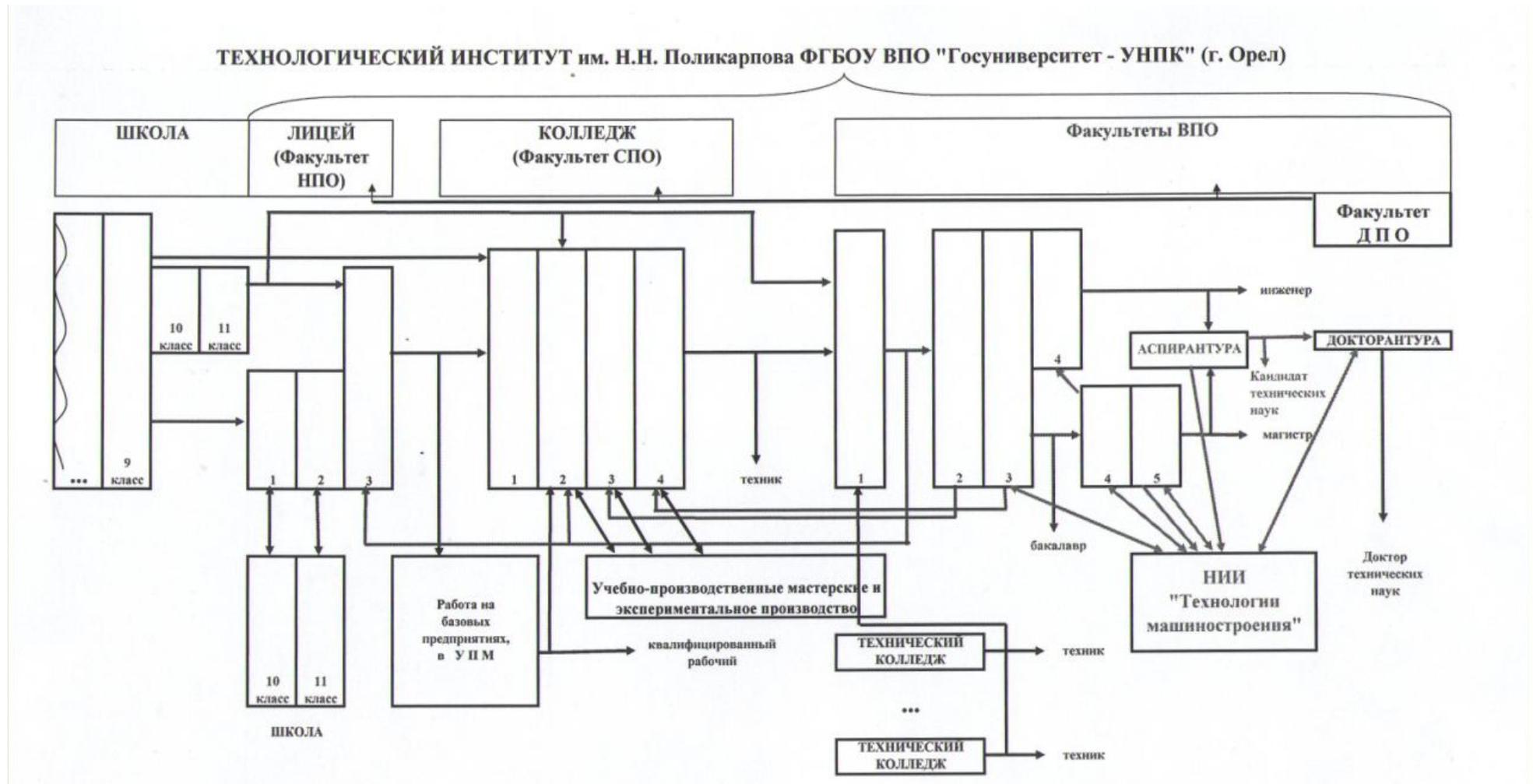
*В статье анализируется система организационно-управленческих и педагогических моделей, которая является базой для разработки метода оценивания компетенций специалиста в соответствии с новым ФГОС ВПО и ФГОС СПО с применением основ современной квалиметрии объектов любой природы*

**Ключевые слова:** квалиметрия, компетентность, специалист, машиностроение.

Качественно новой характеристикой российской системы федеральных государственных стандартов профессионального образования нового поколения является компетентностный подход к реализации задач кадрового обеспечения инновационной экономики России. В соответствии с ФГОС СПО и ФГОС ВПО нового поколения оценка качества подготовки обучающихся и выпускников осуществляется в двух основных направлениях: оценка уровня освоения учебных дисциплин и оценка уровня сформированности социально-профессиональных компетенций. Если процедура оценивания качества усвоения материала по учебной дисциплине имеет системное научное обоснование, то технология оценки уровня сформированности компетенций обучающихся и социально-профессиональной компетентности выпускников системы профессионального образования в настоящее время сформирована фрагментарно. В этой связи целесообразна разработка проблемы создания и реализации модели оценивания, которая реализует схему: ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН → ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИДАКТИЧЕСКИХ УДИНИЦ → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ СИСТЕМЫ КОМПЕТЕНЦИЙ → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТА.

Кроме того, анализ результативности деятельности современного образовательного учреждения, организуемый в СМК вуза, предполагает наличие комплексной системы мониторинговых исследований, которая позволяет выявить как положительные стороны, так и недостатки при реализации и основных, и вспомогательных процессов. В условиях функционирования многоуровневой системы подготовки кадров такие аналитические комплексы приобретают также сложную многоуровневую структуру. Особенности функционирования профильного вуза также определяют специфику формирования такой системы.

Появление профильных вузов на российском образовательном пространстве стало своеобразным ответом региональной системы образования на возрастающие требования бизнес-сообщества к профессиональному образованию. Интегрированные образовательные системы имеют по сравнению с соответствующими автономными образовательными структурами более высокие социально-экономические характеристики. Так, например, Технологический институт им Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс» (ТИ Госуниверситет - УНПК) [3] формировался как обособленное подразделение университета, обеспечивающее подготовку специалистов в интегрированной системе НПО – СПО – ВПО – аспирантура – докторантура (рисунок 1). В состав ТИ Госуниверситет - УНПК входит несколько структурных подразделений: факультет среднего профессионального образования, факультет легкой промышленности, факультет технологии и конструкторско-технологической информатики, а также ряд специализированных научно-исследовательских лабораторий, учебно-производственное и экспериментальное производства и НИС «Технологии машиностроения».



*Рисунок 1 - Многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров для машиностроения в условиях Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс» (2011 г.)*

С учетом специфики структуры формируется и многоуровневый аналитический комплекс квалиметрического оценивания качества подготовки специалистов в СМК такого вуза. Базовыми элементами такого комплекса являются: мониторинг результативности основных процессов; мониторинг результативности вспомогательных процессов; потребительский мониторинг.

Так, например, в ТИ Госуниверситет - УНПК многоуровневый аналитический комплекс мониторинговых исследований организуются Центром социологических исследований «Аналитик» НИИ «Технологии машиностроения», к участию в которых привлекаются студенты гуманитарного факультета, обучающиеся по специальности «Социология», и студенты факультета среднего профессионального образования, обучающиеся по специальности «Прикладная информатика». Исследования основываются на широком использовании современной методологии проведения статистических наблюдений: на этапе сбора информации – анкетирование; на этапе обработки данных – формирование базы данных в Excel; на этапе анализа данных – методы дескриптивной и аналитической статистики, а также экспертно-аналитические методы; статистический анализ полученных данных проводится с применением прикладного программного обеспечения (SPSS 17.0; Expert Decide 2.0); на этапе визуализации аналитических результатов исследования – статистические графики и диаграммы, а также экспертно-аналитические иерархии с построением векторов приоритетов анализируемых показателей [5].

При организации мониторинговых исследований результативности УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА широко используются современные тестовые технологии, реализуемые на факультетах ТИ Госуниверситет - УНПК с применением компьютерной техники. Особое место в этой работе занимает совместная деятельность кафедр и факультетов в рамках выполнения научно-методического проекта «Разработка и внедрение многоуровневой практикоориентированной системы оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения», реализуемого по заявке Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» [4]. Компьютерное тестирование проводится не только по учебным дисциплинам гуманитарного, математического и общетехнического циклов, но и приоритетом являются специальные дисциплины.

Разработанная в ТИ Госуниверситет - УНПК многоуровневая практикоориентированная система оценивания кадров для машиностроения ТИ Госуниверситет - УНПК предназначена для оценивания (таблица 1):

- теоретических и практических навыков специалистов начального звена для машиностроительного производства;
- теоретических и практических навыков специалистов среднего звена для машиностроительного производства;
- теоретических и практических навыков специалистов высшего звена для машиностроительного производства;
- уровня подготовленности специалистов среднего звена в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства;
- уровня подготовленности специалистов высшего звена в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства;
- креативных качеств студентов, склонных к исследовательской и изобретательской деятельности;
- теоретических знаний и практических навыков специалистов начального звена в области автоматизации машиностроительных производств;
- теоретических знаний и практических навыков специалистов среднего звена в области автоматизации машиностроительных производств;
- теоретических знаний и практических навыков специалистов высшего звена в области автоматизации машиностроительных производств;
- уровня подготовленности специалистов в области проектирования технических

и технологических комплексов.

Кроме того, процесс внедрения таких тестовых методик в образовательный процесс профильного вуза предполагает не только разработку и апробацию тестов, но и их последующую сертификацию в органах сертификации тестовых контрольных материалов.

На основании модулей разработанных программно-дидактических тестовых материалов (ПДТМ) после апробационного эксперимента, статистического оценивания качества тестового материала и последующей корректировки ПДТМ формируются электронные базы данных для реализации задач компьютерного тестирования с применением программной оболочки «Конструктор тестов» (свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2005610911), которые также регистрируются в РОСПАТЕНТе.

Таким образом, поэтапно создается многоуровневая система оценивания качества подготовки специалистов по учебным дисциплинам, основу которой составляет система оценивания качества усвоения учебного материала по отдельным дидактическим единицам, которые определены ФГОС СПО, ФГОС ВПО и рабочие программы учебных дисциплин (для вариативной части образовательных программ).

Проблемным остается переход от оценивания знаний, умений и навыков студентов к оцениванию уровня сформированности их социально-профессиональной компетентности. По нашему мнению, основу такой технологии должны составлять теоретические разработки, используемые для квалиметрического оценивания объектов любой природы [1], [2], а также модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате [6], [7].

Актуальность проблемы построения компетентностной модели системы профессиональных характеристик специалиста следует из наличия множества вариантов организационно-содержательного характера ее решения [6]. Крайними его вариантами являются неметрический компетентностный формат (НКФ) и метрический компетентностный формат (МКФ). Разумность выбора формата в определенной мере может зависеть от предметной области, целеполагания и от того, насколько глубоко в образовательном процессе используются компьютерные технологии.

В данный момент весь учебный материал представлен в традиционном учебном формате (ТУФ) и закреплен с помощью действующих ГОС ВПО. Задача состоит в том, чтобы достаточно быстро перевести учебный материал ТУФ в МКФ или НКФ с помощью ГОС ВПО третьего поколения (рисунок 2).

По критерию успешности деятельности различие людей состоит в том, что они имеют разные уровни развития ПК-способностей и разный опыт (знания) решения подобного рода проблем. Проектно-конструктивная деятельность (ПК-деятельность) – это комплекс, состоящий минимум из трех различных фаз работ: сначала проблема формализуется (понимается) человеком (фаза А), затем конструируется решение проблемы (фаза работ В) и только потом исполняется (фаза работ С). Поэтому специалисту для решения проблем какой-либо предметной области необходимо иметь, с одной стороны, высокий уровень развития ПК-способностей (личностных технологий или АВС-способностей) и накопленный опыт (знания в их полноте и целостности) решения подобного рода проблем.

В НКФ все определяется через понятие «компетенция», т.е. если инженер владеет компетенцией, то у него развиты способности решать соответствующие проблемы. В МКФ компетенции определяют направление подготовки на множестве всех способностей, поддерживающих успешную деятельность в этих направлениях, здесь выделяются инвариантные способности (их можно назвать ключевыми) [8]. В качестве их рассматривают естественные способности человека, т.е. проектно-конструктивные или АВС-способности, которые необходимо развить инженеру в направлениях компетенций при его подготовке. Причем при подготовке инженера независимо от направления стараются развить его формализованные (А), конструктивные (В) и исполнительские (С) способности. Поэтому при подготовке в МКФ развитие АВС-способностей инженера представлено через цель, технологию, диагностику оценки качества.

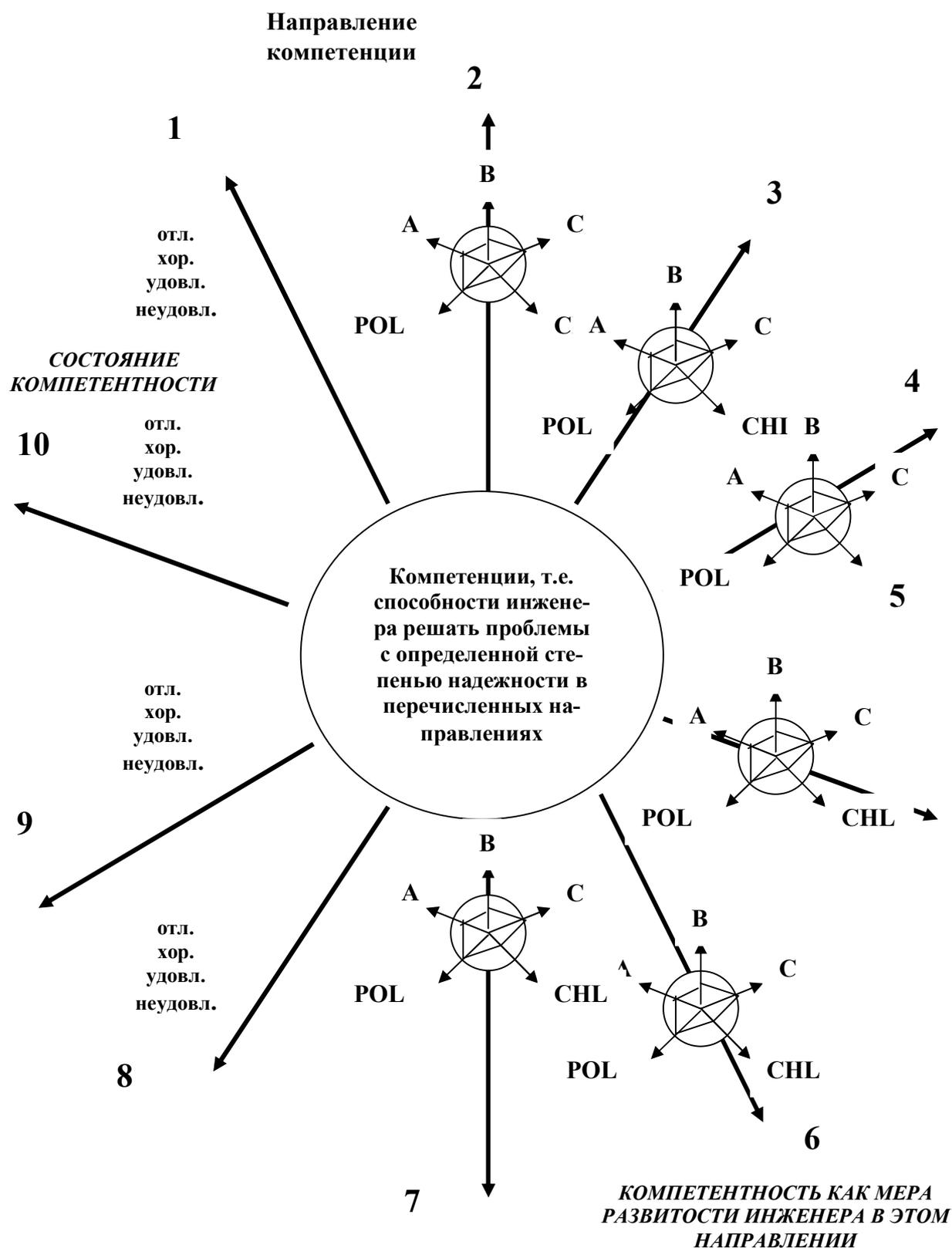


Рисунок 2 – Модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате (Н.К. Нуриев)

Если анализировать ресурсы компетентности, то их можно охарактеризовать полностью (POL) и целостностью (CHL) интерпретированных (освоенных) им знаний об объектах, их связях, процессах и фактах по решению проблем в рамках этих компетенций. Таким образом,

метрики POL и CHL можно рассматривать как значения характеристик показателей освоенности знаний инженером по решению проблем в области его профессиональной деятельности.

В этой связи, комплекс значений показателей «А, В, С, POL, CHL» характеризует актуальное состояние подготовленности инженера в компетентностном формате к решению проблем в определенном направлении деятельности.

В целом, внедрение аналитического комплекса мониторинговых исследований в СМК многоуровневого профильного вуза способствует повышению эффективности диагностики результатов учебной деятельности студентов, принимаемых управленческих решений и оптимизации усилий коллектива при решении наиболее актуальных проблем повышения качества и эффективности своей деятельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, В.И. Оценка качества деятельности образовательного учреждения [Текст] / В.И. Васильев, В.В. Красильников, С.И. Плакий, Т.Н. Тягунова. – М.: Издательство ИКАР, 2005. - 320 с.
2. Васильев, В.И. Статистический анализ многомерных объектов производной природы [Текст] / В.И. Васильев, В.В. Красильников, С.И. Плакий, Т.Н. Тягунова. – М.: Издательство ИКАР, 2004. - 382 с.
3. Киричек, А.В., Морозова А.В., Алисов А.А., Андреев С.В. и др Многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров для машиностроения: история, современность, перспективы: Коллективная монография [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова и др. - М.: Издательский дом «Спектр», 2010. - 368 с.
4. Морозова, А.В. Методологические основы тестовой квалиметрии профессиональных кадров в машиностроении [Текст] / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. - М.: ИД «Спектр», 2010. - 280 с.
5. Морозова, А.В. Управление профессиональной социализацией студентов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения: монография [Текст] / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. - М.: ИД «Спектр», 2010. - 230 с.
6. Нуриев, Н. Двухуровневая образовательная система: благо или вред? [Текст] / Н. Нуриев, Л. Журбенко, С. Старыгина // Высшее образование в России. - 2008. - № 2. - С. 84-91.
7. Нуриев, Н.К. Мониторинг качества подготовки будущего инженера (бакалавра, магистра в компетентностном формате): Учебное пособие. [Текст] / Н.К. Нуриев, Л.Н. Журбенко, С.Д. Старыгина. – Казань, 2007.
8. Сафонова, О.А. Квалитологическая компетентность руководителя [Текст] / О.А. Сафонова, Г.А. Шилова. // Среднее профессиональное образование. - 2008. № 9. - С. 58-60.

### **Морозова Анна Валентиновна**

Заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»

Кандидат социологических наук

Тел.: (4862) 555524

E-mail: niotiuostu@gmail.com

A.V. MOROZOVA

## **THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF A METHOD FOR ESTIMATING THE SPECIALISTS QUALIMETRY FOR THE ENGINEERING PRODUCTION DEVELOPMENT**

*In the article analyzes the system of organizational - managerial and pedagogical models, which is the basis for the development of specialist evaluation method in accordance with the new the federal state educational standard high professional education and secondary professional education and with the foundations of modern qualimetry any field objects*

**Keywords:** *measurement of quality, competence, the expert, mechanical engineering.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Vasil'ev, V.I. Ocenka kachestva dejatel'nosti obrazovatel'nogo uchrezhdenija [Tekst] / V.I. Vasil'ev, V.V. Krasil'nikov, S.I. Plaksij, T.N. Tjagunova. – М.: Izdatel'stvo IKAR, 2005. - 320 s.

2. Vasil'ev, V.I. Statisticheskij analiz mnogomernyh ob#ektov proizvodl'noj prirody [Tekst] / V.I. Vasil'ev, V.V. Krasil'nikov, S.I. Plaksij, T.N. Tjagunova. – M.: Izdatel'stvo IKAR, 2004. - 382 s.
3. Kirichek, A.V., Morozova A.V., Alisov A.A., Andreev S.V. i dr. Mnogourovnevaja praktikoorientiro-vannaja sistema podgotovki kadrov dlja mashinostroenija: istorija, sovremennost', perspektivy: Kollektivnaja monografija [Tekst] / A.V. Kirichek, A.V. Morozova i dr. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. - 368 s.
4. Morozova, A.V. Metodologicheskie osnovy testovoj kvalimetrii professional'nyh kadrov v mashi-nostroenii [Tekst] / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. - M.: ID «Spektr», 2010. - 280 s.
5. Morozova, A.V. Upravlenie professional'noj socializaciej studentov v uslovijah mnogourovnevoj praktikoorientirovannoj sistemy podgotovki kadrov dlja mashinostroenija: monografija [Tekst] / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. - M.: ID «Spektr», 2010. - 230 s.
6. Nuriev, N. Dvuhurovnevaja obrazovatel'naja sistema: blago ili vred? [Tekst] / N. Nuriev, L. Zhurbenko, S. Starygina // Vyshee obrazovanie v Rossii. - 2008. - № 2. - S. 84-91.
7. Nuriev, N.K. Monitoring kachestva podgotovki buduwegogo inzhenera (bakalavra, magistra v kompetentnost-nom formate): Uchebnoe posobie. [Tekst] / N.K. Nuriev, L.N. Zhurbenko, S.D. Starygina. – Kazan', 2007.
8. Safonova, O.A. Kvalitologicheskaja kompetentnost' rukovoditelja [Tekst] / O.A. Safonova, G.A. Shilova. // Srednee professional'noe obrazovanie. - 2008. № 9. - S. 58-60.

### **Morozova Anna Valentinovna**

Deputy Director for research scientific works of Technological institute named by N.N.Polikarpov of State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of sociological science,  
Tel. 4862-55-55-24  
E-mail: niotiostu@gmail.com

# **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 620.1.08 + 62-971.4

М.В. ЛУНИН, М.В. ЯКОВЕНКО, А.В. ЖИДКОВ, А.М. ТЕЛЕПНЕВ

## **АНАЛИЗАТОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ДИАГНОСТИКЕ РАННЕГО РАКА**

*В статье рассмотрены основные положения разработки метода контроля концентрации форменных элементов в жидкой плазме крови. Принцип измерения основан на контроле параметров естественного движения пузырька газа в жидкой плазме крови. Приводятся результаты теоретического исследования с выводами расчётных соотношений для проведения измерения по алгоритму. Приводятся требования к процессу измерения и конструктивным особенностям измерительной кюветы. Приводится средство измерения временного интервала прохождения пузырьком участка среды, с учётом определения положения центра пузырька.*

**Ключевые слова:** онкологическое заболевание; кроветворная система; лимфатическая система; концентрация; диагностика; измерение.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ**

Заболеваемость злокачественными опухолями непрерывно растёт. Ежегодно в мире регистрируется порядка 6 миллионов новых случаев заболевания злокачественными опухолями. Наиболее высокая заболеваемость среди мужчин отмечена во Франции (361 на 100 000 населения), среди женщин в Бразилии (283,4 на 100 000). Отчасти это объясняется старением населения. Следует отметить, что большинство опухолей развивается у лиц старше 50 лет, а каждый второй онкологический больной старше 60 лет. Смертность от онкологических заболеваний занимает в мире второе место после заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Своевременная диагностика раковых образований остается самым уязвимым местом в онкологии. Значительная часть больных начинает лечение в III – IV стадиях заболевания, что соответственно ведет к неудовлетворительным результатам лечения. В противоположность этому возможности диагностики раннего рака достигают 90-100 %, что и определяет логическую задачу необходимости установки диагноза рака на ранних стадиях или динамического наблюдения за теми пациентами, у которых обнаруживаются предраковые изменения в различных участках органов [1].

Одним из таких участков является кроветворная система, костный мозг и лимфатическая система. Существует три вида рака крови со своими симптомами: лейкоз, лимфома и множественная миелома. Лейкемия – злокачественные образования клеток крови, лимфома – опухоли в лимфатической системе и миелома – злокачественные образования в плазме крови. Заболевания кроветворной системы характеризуются угнетением нормального кроветворения, образованием незрелых активных клеток в крови, селезенке, лимфатических узлах, печени и костном мозге.

Для диагностики раннего рака в кроветворной системе применяют методы и средства измерения концентрации, принцип работы которых основан на прохождении ультразвуковых волн через специально подготовленную биологическую среду. Например, аппарат Анализатор биосред акустический БИОМ-01.

Однако применение таких средств и методов измерения требует дополнительного специализированного оборудования для подготовки образца крови к исследованию, а ультразвуковые волны, проходя через образец, способны вызвать изменения в нем и внести дополнительную погрешность.

Таким образом, разработка новых методов и средств диагностики концентрации раковых клеток, основанных на новых принципах измерения, является актуальной задачей.

### **МЕТОД КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЖИДКОЙ ПЛАЗМЕ КРОВИ**

Показателями концентрации растворенных в жидкости веществ могут являться её реологические параметры. К таким параметрам могут относиться вязкость и коэффициент поверхностного натяжения. Показателем концентрации форменных элементов в жидкой плазме крови является гематокритное число.

В основу создаваемого устройства контроля концентрации форменных элементов крови заложена гипотеза о том, что динамический контроль концентрации можно обеспечить, используя пузырёк газа, сформированный естественным путем на границе раздела жидкой и газообразной фаз на выходе сопла, и многократно измеряя время прохождения пузырьком определенного участка, расположенного на траектории его подъема, с определением вязкости, по косвенным зависимостям и оценкой величины концентрации форменных элементов крови [1].

Для определения вязкости существуют два основных метода: метод Пуазейля и метод Стокса. В данном случае, вязкость предлагается контролировать по перемещению пузырька газа в вязкой среде. Поэтому целесообразно использовать метод Стокса, измененный по результатам математического моделирования, которые обычно проводятся при получении формулы Пуазейля [1, 4].

Значение скорости равномерного движения в вязкой среде на оси цилиндра, при  $r \rightarrow 0$  равно:

$$v_{\max} = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l}, \quad (1)$$

где  $(p_1 - p_2)$  – разность давлений в вершинах участка течения  $l$ ;

$R$  – радиус цилиндра вязкой среды;

$\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

Однако движение пузырька будет сложным. Будем считать, что в начальный момент скорость равна нулю, а затем, скорость начнет увеличиваться, и пузырёк будет двигаться с ускорением. Увеличение скорости будет приводить к увеличению силы трения, и замедление роста скорости приведет пузырёк к равномерному движению.

Скорость движения пузырька определим с помощью уравнения:

$$v(t) = v_0 \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{\psi}\right) \right), \quad (2)$$

где  $v_0 = \frac{l_0}{t_0}$  – скорость пузырька при равномерном движении;

$\psi$  – параметр, зависящий от физических свойств жидкости.

Подставим (2) в (1), получим:

$$v_0 \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{\psi}\right) \right) = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l}. \quad (3)$$

Отсюда, вязкость определим как:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2 \cdot t_0}{4 \cdot l \cdot l_0 \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{\psi}\right) \right)}, \quad (4)$$

где  $t_0$  – время прохождения отрезка  $l_0$ .

Таким образом, приведенные зависимости накладывают ограничение на процесс проведения измерения, связанное с обеспечением равномерного ламинарного течения [2].

Поэтому, при проведении экспериментального исследования в исследуемые биологические образцы вносился нормированный объем водного раствора глицерина с динамической вязкостью 100 Па·с [2].

Для апробации принципа измерения была разработана функциональная схема экспериментальной установки для измерения динамической вязкости крови, приведенная на рисунке 1 [3].

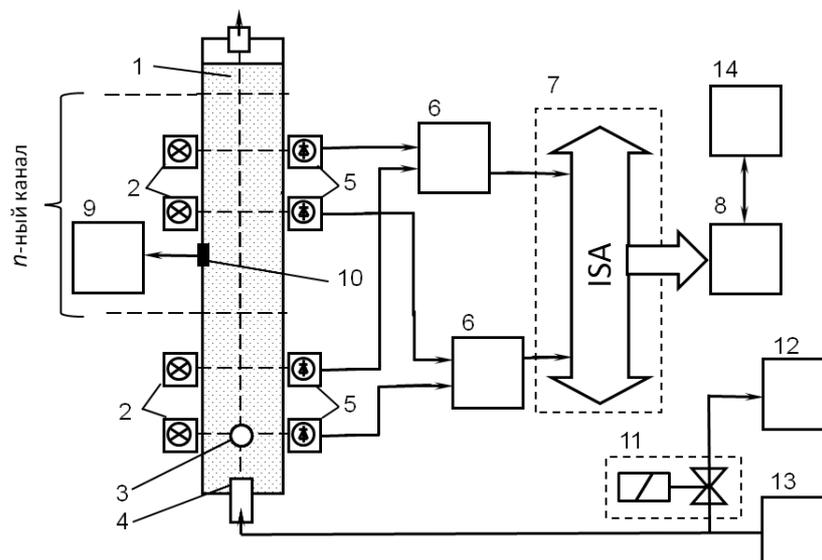


Рисунок 1 – Функциональная схема средства контроля реологических параметров оптически прозрачных жидкостей

В соответствии с рисунком, пузырёк газа 3 из сопла 4, поднимается вдоль оси цилиндрической кюветы 1. Величина потока газа и его температура задаются в блоке 13. Терморезистор 10, вместе с блоком 9 осуществляют измерение температуры жидкости. С целью реализации измерения поверхностного натяжения установлен манометр коленного типа 12 подключаемый к газопроводу электромагнитным клапаном 11. Для повышения точности измерения скорости прохождения пузырька в вязкой среде устанавливается  $n$  оптических каналов, представленных парами источников света 2 и фотоприемниками 5. При этом световому потоку с помощью диафрагмы придаётся прямоугольное сечение. Импульсы, сформированные при прохождении пузырька через оптический канал, менее длительны, чем время прохождения пузырька через оптический канал, что объясняется порогом чувствительности системы. Однако если время начала импульса запаздывает на ту же величину, что и время определения конца импульса при выходе пузырька из светового канала, то это не сказывается на измерении интервалов времени перемещения пузырька.

На устройство обработки информации 6 поступают импульсы от фотоприёмника 5, начало которых соответствует моменту вхождения верхней части пузырька в оптический канал, а конец – выходу из него нижней части пузырька. Эти сигналы обрабатываются соответственно началу и концу движения пузырька в оптическом канале. Затем определяется интервал времени между парами импульсов, соответствующих входу и выходу пузырька из оптических каналов. Эти интервалы времени не одинаковы, так как в процессе подъёма пузырька он расширяется, поэтому вычисляется среднее значение, соответствующее времени перемещения центра пузырька. Полученные значения интервалов времени вводятся в шину 7 и из неё поступают в цифровой процессор 8, который сравнивает значения интервалов времени, получаемые от двух пар оптических каналов. При этом определяется разность полученных интервалов с целью контроля равномерности движения пузырька на рабочем участке измерительной кюветы и среднее значение длительности этих интервалов, позволяющее повысить точность измерения.

Блок 6 получает на канале длительность времени движения пузырька в световом пятне, и с учётом засветки последующих каналов определяет среднее значение диаметра пузырька. Цифровой процессор совместно с блоком запоминания и задания констант 14 выполняют измерение динамической вязкости крови. Данные обрабатываются в соответствии с алгоритмом, разработанным в объектно-ориентированной среде Lab View [3].

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА**

При многократных измерениях времени прохождения пузырька с воздухом через образцы крови с разной концентрацией форменных элементов, были получены экспериментальные данные, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние концентрации форменных элементов крови на изменение временного интервала импульсов, возникающих на паре светодиод-фотодиод при прохождении пузырька воздуха

№ опыта	№ пройденного участка	Показатель гематокрита, %							
		30	35	40	45	50	55	60	65
		Временной интервал, мс							
1	1	40	47	56	63	80	95	117	150
	2	41	49	54	64	79	95	116	149
	3	40	49	55	65	80	95	116	150
2	1	41	47	56	63	79	95	116	149
	2	42	48	54	65	79	94	117	149
	3	42	47	55	63	79	95	116	150
3	1	42	49	54	63	81	95	117	150
	2	41	48	55	64	80	95	118	150
	3	41	48	56	65	79	95	116	149
4	1	40	47	56	65	81	94	118	150
	2	42	47	55	64	80	94	116	149
	3	41	48	56	65	80	95	117	150
5	1	42	47	55	65	80	94	118	149
	2	40	49	54	65	79	94	116	150
	3	41	49	55	64	79	94	117	149
6	1	41	47	56	65	81	95	116	149
	2	41	49	54	64	80	95	117	150
	3	42	48	55	65	79	95	118	150
7	1	40	47	56	64	80	95	116	150
	2	41	48	56	63	80	95	118	149
	3	41	49	55	65	81	95	116	149

После обработки экспериментальных данных, представленных в таблице 1, по формуле 4 были получены значения динамической вязкости образцов крови с разной концентрацией форменных элементов и построен график (см. рис. 2). Из рисунка видно, что данный график представляет собой экспоненциальную функцию и отражает физический смысл зависимости концентрации форменных элементов крови от вязкости [4].

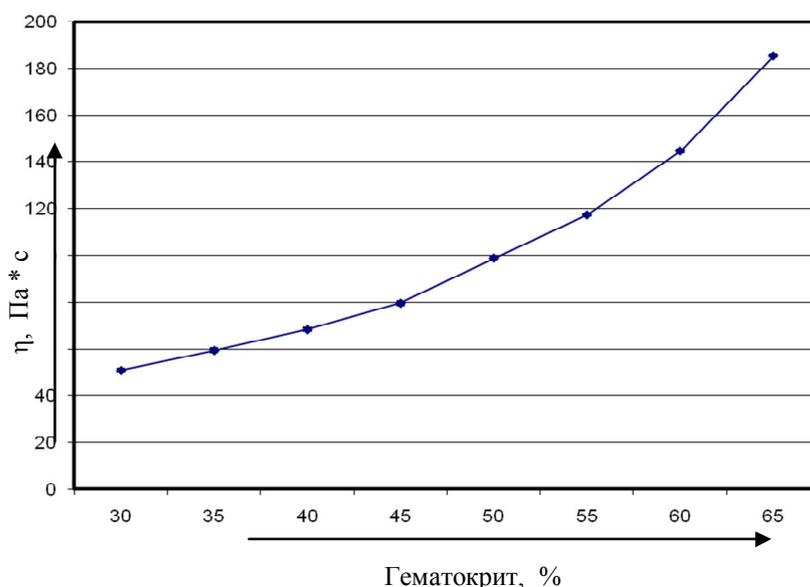


Рисунок 2 – Влияние концентрации форменных элементов крови на изменение её вязкости

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА

При создании подобных устройств особые требования следует предъявлять к быстродействию канала измеряющего время прохождения пузырька газа.

На рисунке 3 приведена структурная схема устройства контроля концентрации форменных элементов крови.

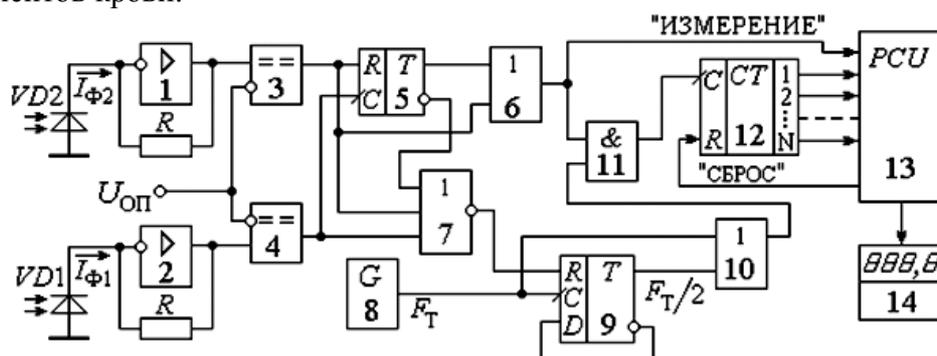


Рисунок 3 - Структурная схема устройства контроля концентрации форменных элементов крови

При движении пузырька газа сначала повышается ток  $I_{\Phi 2}$  и напряжение на выходе усилителя 2 становится больше опорного  $U_2 = I_{\Phi 2}R > U_{оп}$ . При этом срабатывает компаратор 4, сравнивающий напряжения  $U_2$ ,  $U_{оп}$ , и формирует импульс длительностью  $T_{и1}$ . Затем повышается напряжение на выходе усилителя 1 и срабатывает компаратор 3, формирующий импульс с длительностью  $T_{и2}$ . Триггер 5 срабатывает по фронту импульса напряжения  $U_4$  на выходе компаратора 4 и возвращается в исходное состояние по фронту импульса  $U_3$  на выходе компаратора 3, поступающего на R-вход триггера 5. К выходам компараторов 3, 4 подключен элемент 6 типа 2ИЛИ для формирования интервала измерения  $T_{изм}$ , а также элемент 7 типа 3ИЛИ-НЕ, которым выделяется интервал времени  $\Delta T_{изм} = T_{изм} - T_{и1} - T_{и2}$  между выходными импульсами компараторов 3, 4.

При появлении на инверсном выходе триггера 5 нулевого уровня напряжения и наличии нулевых сигналов на выходах компараторов 3 и 4 появляется высокий (единичный) уровень напряжения на выходе элемента 7 типа 3ИЛИ-НЕ, выходным сигналом  $U_7$  которого устанавливает в нулевое состояние триггер 9. При этом на выходе логического элемента 10 типа 2ИЛИ формируются импульсы с частотой  $F_T$ , а в остальное время частота этих импульсов уменьшается вдвое до уровня  $0,5F_T$ .

С выхода элемента 10 типа 2ИЛИ импульсы напряжения  $U_{10}$  переключаемой частоты через логический элемент 11 типа 2И поступают на счетный вход счетчика 12. Элемент типа

2ИЛИ 6 применен для выделения времени измерения  $T_{ИЗМ}$  и формирует сигнал  $U_6$  при появлении высокого уровня напряжения на выходах триггера 5 или компаратора 3. Этот сигнал  $U_6$  также поступает на микропроцессор 13 как команда "Измерение", вначале которой микропроцессор 13 формирует короткий импульс, подаваемый на R-вход счетчика импульсов 12 для его установки в нулевое состояние. Поэтому счетчик 12 реализует операцию цифрового измерения интервала времени  $T_{ИЗМ}$  посредством его заполнения тактовыми импульсами с переключаемой частотой  $F_T$  и  $0,5F_T$ . При этом число импульсов, поступающих с выхода элемента 11 на счетчик 12 в течение интервала одного измерения, определяется формулой:

$$N_{11} = 0,5F_T \cdot (T_{И1} + T_{И2}) + F_T \cdot \Delta T_{ИЗМ}. \quad (5)$$

По окончании цикла измерения полученный код  $N_{11}$  с выходов счетчика 12 записывается в оперативное запоминающее устройство микропроцессора 13 и после преобразования в десятичную форму и умножения на коэффициент преобразования выводится на цифровой индикатор 14 [5].

Временные диаграммы работы устройства приведены на рисунке 4.

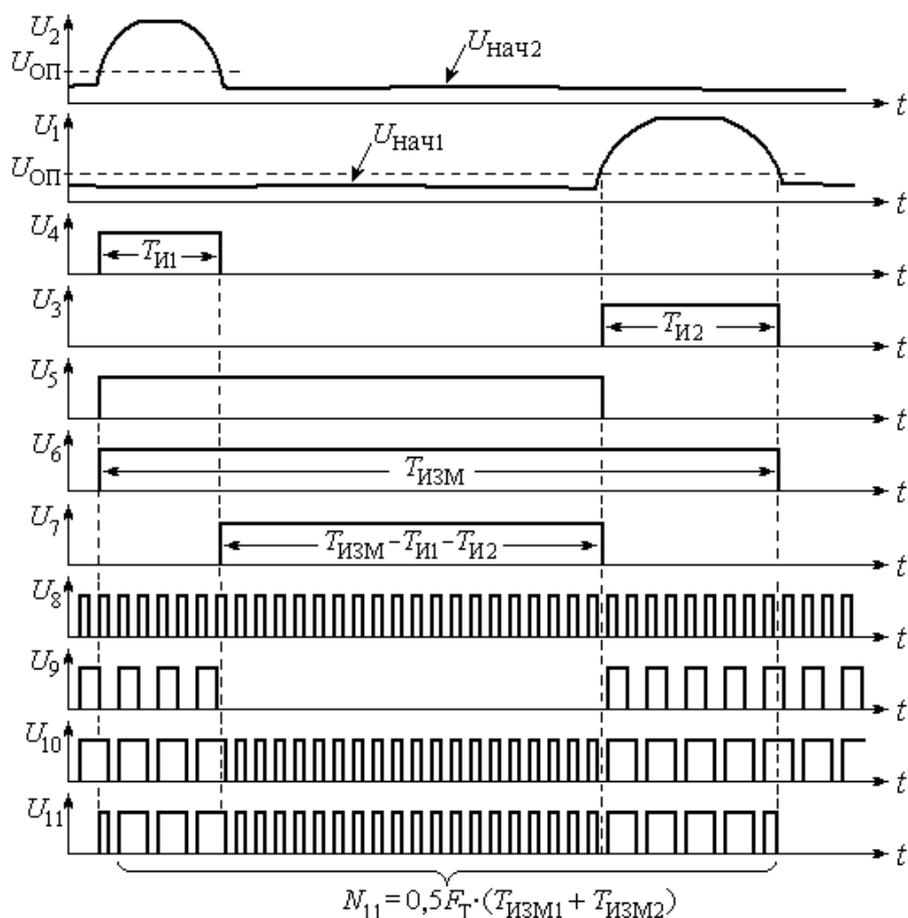


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы устройства

### ВЫВОДЫ

1. Подтверждена гипотеза о возможности создания информационно-измерительной системы диагностики концентрации форменных элементов крови с определением показателя гематокрита.

2. С использованием водного раствора глицерина, установлен диапазон контроля динамической вязкости от 50 Па·с до 185 Па·с для значений показателя гематокрита от 30 % до 65 % соответственно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окорочков, А.Н. Диагностика болезней внутренних органов. Диагностика болезней системы крови. Диагностика болезней почек. Т.5. [Текст] / А.Н. Окорочков. - М.: Медицинская литература, 512 с.: ил.
2. Гематология: Новейший справочник: Современная клиническая гематология; Методы диагностики и лечения заболеваний системы крови; Новейшие данные о кроветворении [Текст] / Под общ. ред. Абдулкадырова К.М. - М.: Морфология и функции, 2004. - 928 с.: ил.
3. Лунин, М. В. Метод и средство контроля температуры вязких жидкостей. [Текст] / М. В. Лунин, М. С. Костин, А. Ю. Медведева. // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 3-2. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – С. 66 – 72.
4. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол - М.: Мир, 540 с., ил.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 1. [Текст] / И.В. Савельев - М.: Наука, 1970. – 512 с.

**Лунин Максим Викторович**

Государственный университет-УНПК, г. Орел  
к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 419876  
E-mail: pms35@ostu.ru

**Яковенко Михаил Викторович**

Государственный университет-УНПК, г. Орел  
к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 419876  
E-mail: pms35@ostu.ru

**Жидков Алексей Владимирович**

Государственный университет – УНПК, г. Орел  
Студент группы 31 – ИД кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. 8-953-618-68-28  
E-mail: alexik1991@mail.ru

**Телепнев Александр Михайлович**

Государственный университет – УНПК, г. Орел  
Студент группы 31 – ИД кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 419876  
E-mail: pms35@ostu.ru

---

M.V. LUNIN, M.V. YAKOVENKO, A.V. ZHIDKOV, A.M. TELEPNEV

**THE ANALYZER FOR DEFINITION OF CONCENTRATION  
OF COMPONENTS OF BIOLOGICAL LIQUIDS IN DIAGNOSTICS  
OF THE EARLY CANCER**

*In article substantive provisions of working out of a method quality monitoring of concentration of uniform elements in liquid plasma of blood are considered. The measurement principle is based on the control of parameters of natural movement of a vial of gas in liquid plasma of blood. Results of theoretical research with conclusions of settlement parities for measurement carrying out on algorithm are resulted. Requirements to process of measurement and design features measuring ditches are led. Are resulted a gauge of a time interval of passage by a vial of a site of environment, with the account of definition of a material point in the vial centre.*

**Keywords:** *oncological disease; hematopoietic system; lymphatic system; concentration; diagnostics; measurement.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Okorokov, A.N. Diagnostika boleznej vnutrennih organov. Diagnostika boleznej sistemy krovi. Diagnostika boleznej pochek. T.5. [Tekst] / A.N. Okorokov. - M.: Medicinskaja literatura, 512 s.: il.
2. Gematologija: Novejsnij spravocnik: Sovremennaja klinicheskaja gematologija; Metody diagnostiki i lechenija zabolevanij sistemy krovi; Novejshie dannye o krovetvorenii [Tekst] / Pod obw. red. Abdulkadyro-va K.M. - M.: Morfologija i funkcii, 2004. - 928 s.: il.

3. Lunin, M. V. Metod i sredstvo kontrolja temperatury vjazkih zhidkостей. [Tekst] / M. V. Lunin, M. S. Kostin, A. Ju. Medvedeva. // Izvestija OrelGTU. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i teh-nologii. - № 3-2. – Orel: OrelGTU, 2009. – S. 66 – 72.

4. Bendat, Dzh. Prikladnoj analiz sluchajnyh dannyh [Tekst] / Dzh. Bendat, A. Pirsol - M.: Mir, 540 s., il.

5. Savel'ev, I.V. Kurs obvej fiziki. T. 1. [Tekst] / I.V. Savel'ev - M.: Nauka, 1970. – 512 s.

**Lunin Maxim Victorovich**

State University – UNPK, t. Orel

PhD in Technical Sciences, Assistant Professor of Faculty “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 419876

E-mail: pms35@ostu.ru

**Yakovenko Michael Victorovich**

State University – UNPK, t. Orel

PhD in Technical Sciences, Assistant Professor of Faculty “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 419876

E-mail: pms35@ostu.ru

**Zhidkov Aleksey Vladimirovich**

State University – UNPK, t. Orel

The student of group 31 – ID of Faculty “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: 8-953-618-68-28

E-mail: alexik1991@mail.ru

**Telepnev Alexander Michailovich**

State University – UNPK, t. Orel

The student of group 31 – ID of Faculty “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 419876

E-mail: pms35@ostu.ru

В.В. ЛОМАКИН, С.С. ТРУХАЧЕВ, М.И. ТРУХАЧЕВА

## БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕРЕБРАЛЬНОЙ ИШЕМИИ У ПЛОДА И НОВОРОЖДЁННОГО

*Предложено структурное представление интеллектуальной системы формирования эффективного управленческого решения в области биомедицины с использованием метода декомпозиции и объектно-ориентированного подхода, на основе которого была реализована биотехническая система, позволившая скорректировать методы предупреждения возникновения церебральной ишемии у плода и новорожденного.*

**Ключевые слова:** интеллектуальная система; управленческое решение; предупреждение церебральной ишемии; биотехническая система.

Одной из приоритетных и стратегических задач государства является сохранение здоровья населения в целом и в частности каждого отдельного человека. В связи с чем Российское правительство и Президент особое внимание уделяют «нано-, био-, информационным и когнитивным технологиям», обозначенным как критические технологий РФ, согласно Указу Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899. Разработка биотехнической системы, осуществляющей формирование управленческого решения на основе математических методов статистического анализа и теории интеллектуальных систем, применяемых в области медицины, является высокоперспективным направлением исследований современной науки, открывающей широкие возможности применения высокотехнологичных научных разработок в повседневной жизни.

На сегодняшний день в России и за рубежом церебральная ишемия у плода и новорожденного является ведущим заболеванием перинатального периода [1]. В отдельных случаях данное заболевание приводит к инвалидизации детей, а в тяжёлых – не исключен и летальный исход. Данной проблеме уделяется большое внимание научных и медицинских работников, но, несмотря на это, на сегодняшний день не существует однозначной методики исследования механизмов развития церебральной ишемии. С учетом медицинской, социальной и демографической важности данной проблемы необходимо детализировано исследовать факторы риска возникновения церебральной ишемии у новорожденных на основе современных методов статистического анализа, и разработать биотехническую систему, позволяющую формировать вектор управленческих решений для задач прогнозирования возможного характера течения патологии заболевания и его предупреждения с использованием современных методик построения интеллектуальных систем.

Разрабатываемая биотехническая система принятия управленческих решений (рис.1) имеет следующие модули: модуль формализации запроса пользователя; математическая модель предметной области; модуль принятия решения; аналитический модуль; модуль визуализации.

Формирование эффективной среды принятия управленческих решений строится с использованием эргономичного пользовательского интерфейса, при помощи которого осуществляется ввод в биотехническую систему входных запросов пользователей с учетом того, что у них могут отсутствовать специализированные знания в области информационных технологий; также осуществляется возможность добавления данных в базу знаний при неполном существующем описании предметной области и различных корректировок при формировании управленческих решений; осуществляется вывод аналитической информации в удобной для восприятия форме и принятия конкретного управляющего решения для поставленной задачи.

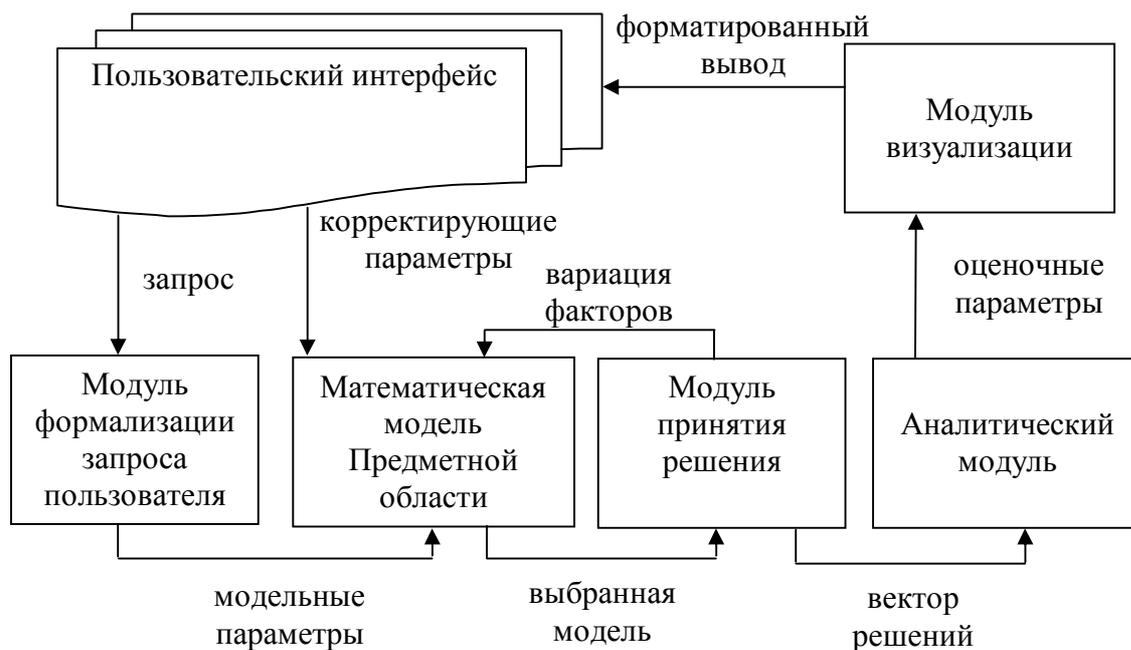


Рисунок 1 – Структурное представление биотехнической системы принятия управленческих решений

Все запросы пользователей поступают в модуль формализации запросов, который осуществляет функциональную связь между тезаурусами и диалектами пользователей и лингвистической средой биотехнической системы. Аналогичный подход в построении интеллектуальных систем поддержки принятия решений был предложен в работе [2].

Модуль, содержащий математические модели предметной области, формируется на этапе реализации системы, с возможностью добавления моделей в ходе её эксплуатации. Математические модели строятся на основе статистических методов регрессионного анализа с использованием методов факторного и корреляционного анализа. Для формирования управленческих решений в прогнозировании церебральной ишемии у плода и новорождённого было проанализировано 324 медицинских историй, в которых были установлены ишемические состояния в постнатальном периоде. В результате факторного анализа было выявлено 7 групп факторов: прегравидарные риски; антропометрические данные супругов; инфекционные и воспалительные риски; патология гестации; патология родов; патология постнатального периода; антропометрические данные новорождённого. В группу прегравидарных рисков вошли следующие факторы: акушерско-гинекологический и андрологический анализ, соматическое и репродуктивное здоровье супругов, их вредные привычки, жилищно-бытовые, неблагоприятные экологические и профессиональные факторы. Инфекционные и воспалительные риски рассматривались только в генитальной и экстрагенитальной локации. Данная совокупность групп факторов легла в основу базовой математической модели для рассматриваемой предметной области.

Модуль принятия решения позволяет осуществить рациональный выбор на основе корреляционной вариации количественных показателей факторов из всех существующих моделей биотехнической системы той модели, которая обеспечит построение эффективного управленческого решения. Для выбранной модели формируется исходный программный код, который запускается на выполнение при помощи встроенных средств трансляции, в результате чего формируется вектор выработанных решений, который передается в аналитический модуль.

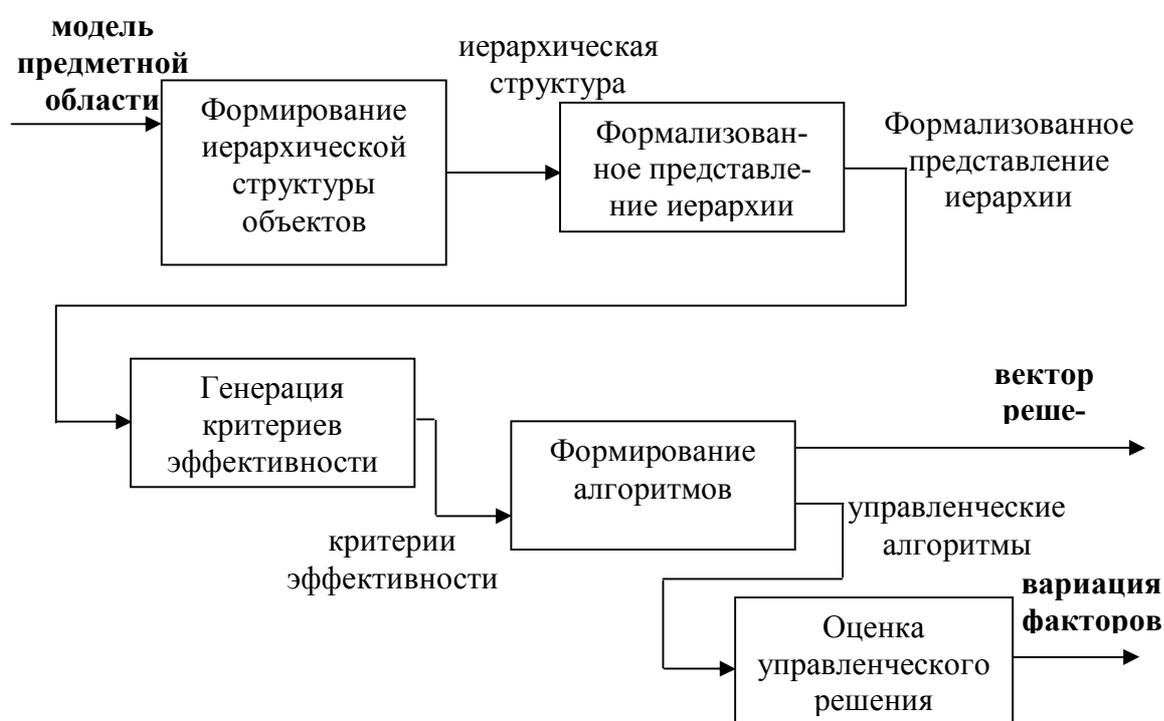
Аналитический модуль осуществляет анализ эффективности полученного вектора решений и производит расчет его оценочных параметров с последующей передачей данных в модуль визуализации.

Модуль визуализации на основе выработанного вектора решений и полученной ана-

литической информации формирует выходные расчетные данные в удобном для пользователя виде и осуществляет возможную корректировку пользователем полученного управленческого решения, данные которого сохраняются в базе знаний для последующей модификации соответствующего математического описания в модуле, содержащем математическую модель предметной области.

Для формирования эффективных управленческих решений разрабатываемая биотехническая система обладает корректирующей обратной связью, функционально соединяющей модуль визуализации с модулем, содержащим математические модели предметной области.

Разработка модуля принятия управленческих решений базировалась на современных научных методологиях проектирования с использованием механизма декомпозиции и объектно-ориентированного подхода (рис. 2), при помощи которых были выделены пять итерационных этапов его функционирования: 1) формирование иерархической структуры объектов; 2) формализация иерархии объектов; 3) генерация критериев эффективности; 4) формирование алгоритмов выбора эффективного управленческого решения; 5) оценка выбранного управленческого решения и формирование корректировок.



*Рисунок 2 – Структурное представление модуля принятия управленческих решений*

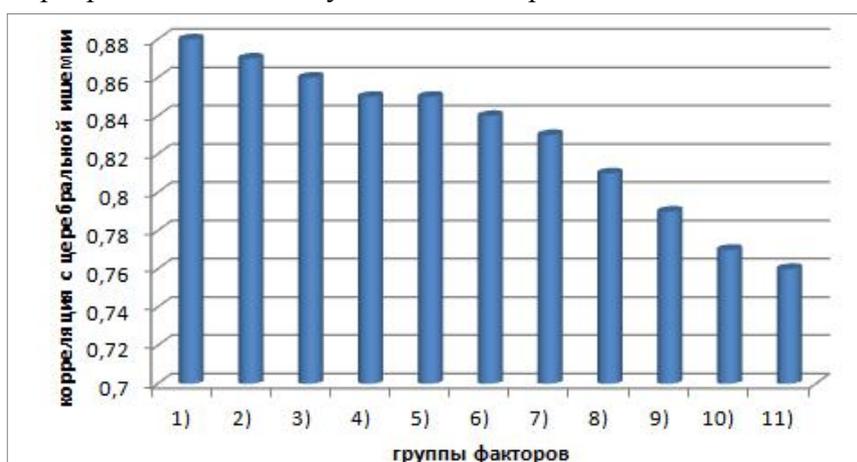
Построение иерархической структуры объектов основывается на адекватном представлении группы систем, объединяемых по областям целевого назначения или особенностям их применения. Для генерации унифицированного графо-лингвистического описания иерархических структур данных использовалась нотация UML с последующей обработкой программно-лингвистическими средствами биотехнической системы принятия эффективных управленческих решений и получения формализованного представления требуемой иерархии объектов. Выбор оптимизационного алгоритма формирования эффективного управленческого решения основывается на ранее сгенерированных критериях эффективности с выработкой возможных альтернативных путей решения по накопленным знаниям и опыту в биотехнической системе. Многомерные данные базы знаний сворачиваются на основе статистической алгоритмической обработки по медиане сечения группы объектов, развёрнутых во времени. В качестве метода принятия решений используется модифицированный метод анализа иерархий, адаптированный для предлагаемых программно-лингвистических средств биотехнической системы. После оценки и корректировки полученного управленческого ре-

шения формируется выходной вектор решений, поступающий на обработку в аналитический модуль биотехнической системы.

На основе разработанной биотехнической системы формирования эффективного управленческого решения в обозначенной предметной области была установлена неинформативность бальной оценки состояния новорождённого по шкале Апгар в рамках прогнозирования возникновения церебральных ишемических поражений. Данное обстоятельство объясняется тем, что неврологическая симптоматика, обусловленная церебральной ишемией, проявляется позднее пяти минут жизни новорожденного, в течение которых устанавливается бальная оценка его состояния по шкале Апгар.

Исследования влияния рассматриваемых факторов на возникновение ишемических патологий с уровнем ошибки в 0,01 позволяют сделать вывод о наибольшей корреляции церебральной ишемии у новорождённых с 1) рецидивирующей угрозой прерывания беременности (коэффициент корреляции  $r=0,88$ ); 2) возрастом первородящей ( $r = 0,87$  при возрасте больше 30 лет); 3) преэклампсией средней и тяжёлой степени ( $r = 0,86$ ); 4) хронической фетоплацентарной недостаточностью ( $r = 0,85$ ); 5) дискоординированной родовой деятельностью ( $r = 0,85$ ); 6) задержкой внутриутробного развития плода ( $r = 0,84$ ); 7) осложнёнными абортами ( $r=0,83$ ); 8) гиперандрогенией ( $r = 0,81$ ); 9) длительной токолитической терапией ( $r = 0,79$ ); 10) атлетическим типом телосложения беременной ( $r = 0,77$ ); 11) хроническим эндометритом ( $r = 0,76$ ) (рис. 3).

В рамках разработанной биотехнической системы была сформирована единая система суждений и разработана онтология предметной области, обеспечивающая полноту знаний. Онтология позволяет сформировать общий словарь, с помощью которого смогут взаимодействовать эксперты из различных предметных областей. В статье рассмотрен пример такой области. На основе сформированного вектора управленческих решений можно сделать вывод о том, что профилактика различных осложнений, возникающих во время беременности и приводящих к угрозам её прерывания, является наиболее эффективным управляющим воздействием в данной предметной области. Наряду с этим необходимо проводить информационные мероприятия среди подростков на тему полового воспитания, способов защиты от инфекций, передающихся половым путём, вреде абортов. Необходимо пропагандировать молодёжь на своевременное создание полноценных семей и рождение здорового потомства. При наличии у беременной женщины хотя бы одного из ранее перечисленных факторов особое внимание следует уделить профилактическим мероприятиям, направленным на снижение риска развития церебральной ишемии у плода и новорождённого.



*Рисунок 3 – Корреляция возникновения церебральной ишемии у новорождённых с рассматриваемой группой факторов*

Разработанную биотехническую систему принятия эффективных управленческих решений в рассматриваемой предметной области рекомендуется использовать в качестве прогностической модели возникновения и развития церебральной ишемии у плода и новорож-

дённного с целью проведения своевременной и действенной медицинской профилактики и исключения возможного заболевания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы. ГК № 14.740.11.0591 от 05.10.2010.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Яковлева, О.В. Ведущие факторы формирования церебральной ишемии у новорожденного [Текст] / О.В. Яковлева, Л.В. Музурова, Н.И. Зрячкин // Саратовский научно-медицинский журнал. - 2010. - Т. 6, № 4 - С. 772-774.

2. Шкундина, Р.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе онтологии в сложных биосистемах [Текст] / Р.А. Шкундина // Прикладная информатика. - 2006. - № 5 - С. 98-103.

**Ломакин Владимир Васильевич**

ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой информационного менеджмента

308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, (4722)30-12-94

E-mail: lomakin@bsu.edu.ru

**Трухачев Сергей Сергеевич**

ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

кандидат технических наук, доцент кафедры информационного менеджмента

308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, (4722)30-12-94

E-mail: trukhachev@bsu.edu.ru

**Трухачева Мария Ивановна**

ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

врач-ординатор

308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, (4722)30-12-94

E-mail: trukhacheva@bsu.edu.ru

---

V. V. LOMAKIN, S. S. TRUKHACHEV, M. I. TRUKHACHEVA

## **BIOTECHNICAL SYSTEM FOR THE EFFECTIVE DECISION MAKING ON THE EXAMPLE OF FETUS AND NEWBORN CEREBRAL ISCHEMIA FORECASTING**

*Structural representation of intellectual system, allowing to form the effective administrative decision in the field of biomedicine, with use of a method of decomposition and the object-oriented approach on which basis the biotechnical system. On the basis of this representation the biotechnical system, allowed to correct methods of the prevention of occurrence of a cerebral ischemia at a fruit and the newborn has been realized.*

**Keywords:** *intellectual system; administrative decision; the prevention of occurrence of a cerebral ischemia; biotechnical system.*

**Lomakin Vladimir Vasilyevich**

FSAEU HPE «Belgorod state national reseach university»

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer, Managing department of information management

308015, Belgorod, Pobedy street, 85, (4722)30-12-94

E-mail: lomakin@bsu.edu.ru

**Trukhachev Sergey Sergeevich**

FSAEU HPE «Belgorod state national reseach university»

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer department of information management

308015, Belgorod, Pobedy street, 85, (4722)30-12-94

E-mail: trukhachev@bsu.edu.ru

**Trukhacheva Maria Ivanovna**

FSAEU HPE «Belgorod state national reseach university»

the doctor intern

308015, Belgorod, Pobedy street, 85, (4722)30-12-94

E-mail: trukhacheva@bsu.edu.ru

А.А. НОВИКОВ

## РАЗРАБОТКА И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АГРЕГАТОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Показано, что при построении математической модели для решения одной и той же задачи на разных этапах целесообразно изменять математическую модель, начиная с простейшей модели, и затем ее постепенного усложнения для учета дополнительных явлений и связей, которые на начальном этапе были отброшены как несущественные.*

*Для построения и анализа математической модели информационно-управляющей системы автономного объекта в составе структуры агрегата бесперебойного электропитания разработана функциональная схема интегрированного статического преобразователя как основного составляющего элемента агрегата бесперебойного электропитания. Из приведенной функциональной структуры определена структура математической модели преобразователя.*

**Ключевые слова:** математическая модель; агрегаты бесперебойного электропитания; информационно-управляющая система; интегрированный статический преобразователь; автономный объект.

При построении математической модели пользуются известным подходом, когда при решении одной и той же задачи на разных этапах принимают разную математическую модель: начинают с простейшей модели, а затем ее постепенно усложняют, с тем, чтобы учесть дополнительные явления и связи, которые на начальном этапе были отброшены как несущественные.

Это обусловлено тем, что к математической модели предъявляются противоречивые требования: она должна с одной стороны отражать как можно полнее свойства оригинала, а с другой стороны, быть по возможности простой, чтобы не усложнять исследование.

С учетом этого для построения и анализа математической модели информационно-управляющей системы (ИУС) автономного объекта (АО) в составе структуры агрегата бесперебойного питания (АБП) проведем построение функциональной схемы интегрированного статического преобразователя (ИСП) как основного составляющего элемента АБП.

На рисунке 1 представлена обобщенная функциональная схема статического преобразователя, отвечающая требованиям к АБП, сформулированным выше [1].

Такая схема спроектирована на основе общей структуры АБП с учетом требований, предъявляемых к параметрам питания ответственных потребителей:

- низкий уровень пульсаций выходного параметра – напряжения постоянного тока;
- устойчивость к импульсным перенапряжениям на входе преобразователя;
- устойчивость к внешним коротким замыканиям, малые значения постоянных времени и отклонений стабилизируемого параметра переходных процессов при различных коммутационных режимах;
- защита от превышения напряжения величины заданного значения, как на входе, так и на выходе.

При этом необходимо иметь в виду временные задержки прохождения сигнала управления и сигнализации, как местного, так и дистанционного характера.

Эти задержки будем считать пренебрежимо малыми по сравнению с достаточным временем преобразования сигнала управления, то есть ими можно пренебречь.

Такое допущение можно сделать, благодаря применению современных микроконтроллеров с развитой периферической структурой и мощным логико-математическим ядром. Допущение является первым из нескольких, которые будут сформулированы несколько позже.

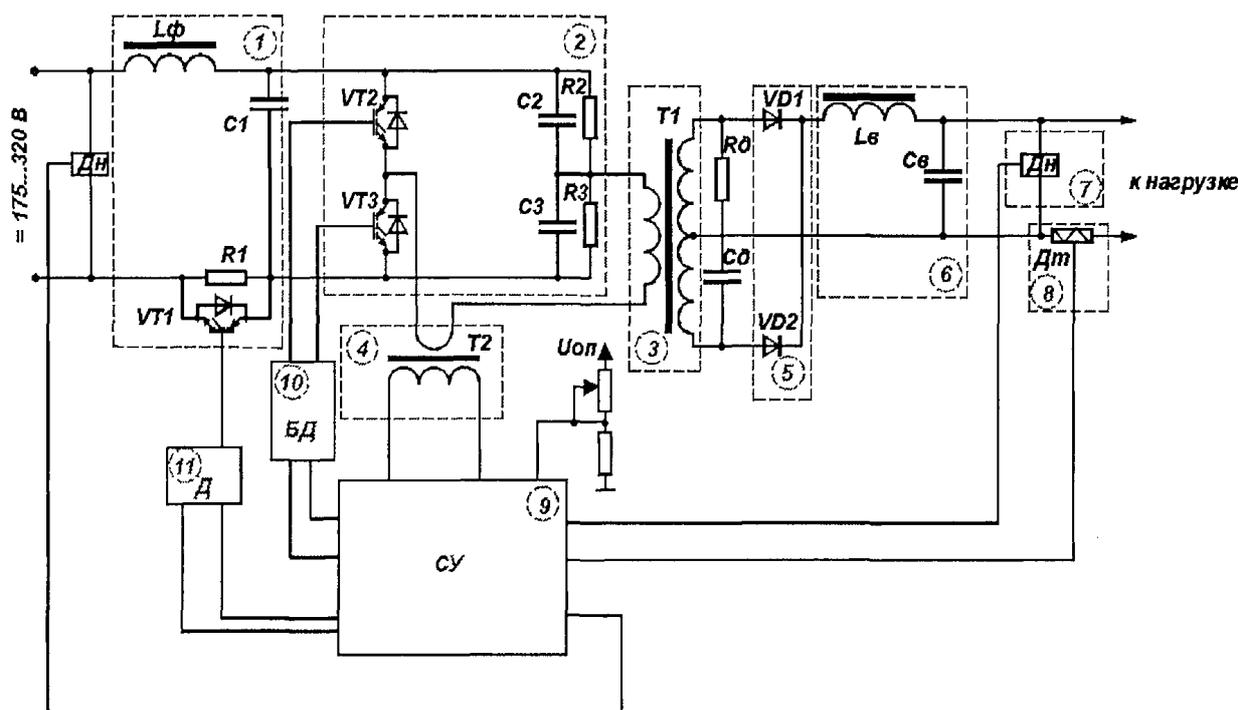


Рисунок 1 – Функциональная схема ИСП

На схеме обозначены: 1 – входной фильтр, 2 – инвертор, 3 – силовой трансформатор, 4 – трансформатор тока, 5 – выпрямитель, 6 – выходной фильтр, 7 – датчик напряжения, 8 – датчик тока, 9 – система управления, 10 – блок драйверов, 11 – драйвер.

С использованием такой функциональной структуры можно проводить построение комплексных устройств.

Как можно увидеть, функциональная схема на рисунке 1 получается достаточно сложной для непосредственного перехода к структуре математической модели. Это обуславливается наличием узла с переменной структурой (входной фильтр ИКП), наличием двойного преобразования тока (ТТ и ДТ), наличием ключей инвертора, имеющих свои постоянные времени переходных процессов в режимах отпирания и запирающего перехода и др. Причем параметры полупроводниковых приборов и реактивных цепей колеблются в определенных пределах, что связано с технологией изготовления узлов и элементов их составляющих.

Из приведенной функциональной структуры вытекает структура математической модели преобразователя.

Раскроем передаточные функции физических процессов, протекающих в основных узлах схемы преобразования и регулирования. Составим приведенную структуру модели ИУС ИСП, приняв некоторые допущения (рис. 2).

Такая структура позволяет перейти к математическому описанию модели ИУС АБП АО рассматриваемых АБП, применив принципы теории автоматического управления (ТАУ), используемые при проектировании и исследовании нелинейных импульсных САУ [2].

Для определения соотношений передаточных функций для звеньев линеаризованной структуры математической модели введем следующие допущения:

- напряжение, прикладываемое к входу преобразователя, является идеальным, т.е. напряжение имеет строго постоянный характер без отклонений и без импульсных перенапряжений;
- элементы, составляющие инвертор, а также силовой трансформатор: силовые ключи, активные и реактивные элементы - идеальные, вебер-амперная характеристика сердечника линейна (трансформатор не насыщается, индуктивность рассеяния отсутствует), таким образом, инвертор через трансформатор полностью дублирует сигналы управления, усиливая их по амплитуде;
- диоды выпрямителя - идеальные, т.е. не имеют потерь и реактивных параметров;

- временами нарастания переднего фронта и спада заднего фронта сигналов управления можно пренебречь, т.е. импульсы управления имеют идеальную прямоугольную форму;
- демпферная КС-цепь отсутствует, так как паразитными реактивными параметрами цепей преобразования можно пренебречь;
- элементы выходного фильтра представляют собой идеальную емкость и идеальную индуктивность;
- соединительные провода – без потерь, реактивные параметры проводов - нулевые, за исключением соединений выходного фильтра;
- импульсы управления передаются на вход фильтра мгновенно без задержки в цепях передачи.

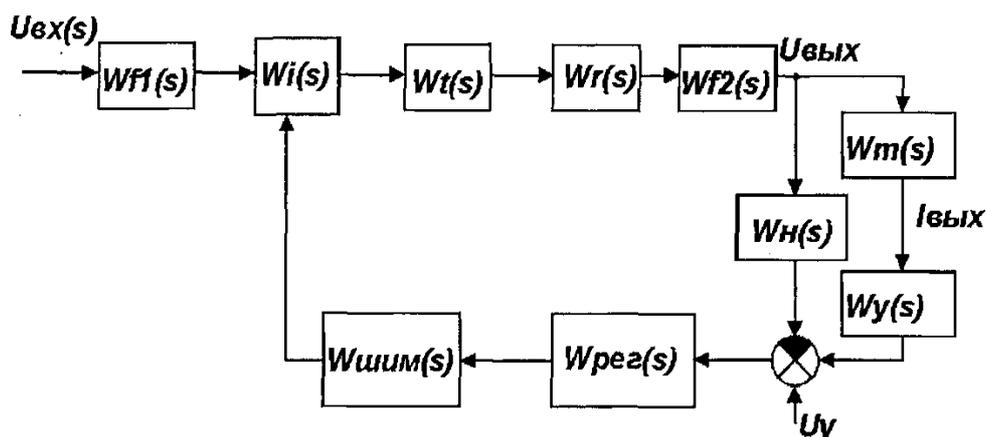


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели ИУС АБП АО

Центральным узлом структуры является регулятор (в общем случае – это ПИД-регулятор) и широтно-импульсный модулятор (ШИМ).

Контур нагрузки представляет собой последовательное соединение звеньев: датчика тока  $W_m(s)$  с согласующим усилителем  $W_y(s)$ .

Оба звена представляют собой пропорциональные звенья, также как и датчик напряжения  $W_H(s)$ :

$$W_m(s) = k_2, k_2 \ll 1,$$

$$W_y(s) = k_3, k_3 \gg 1,$$

$$W_H(s) = k_4, k_4 \gg 1.$$

Передаточная функция ПИД, как следует из названия, содержит пропорциональное, интегральное и дифференциальное звенья, соединенные параллельно (рис. 3).

Соответственно, передаточная функция ПИД определяется соотношением (1):

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}}s. \quad (1)$$

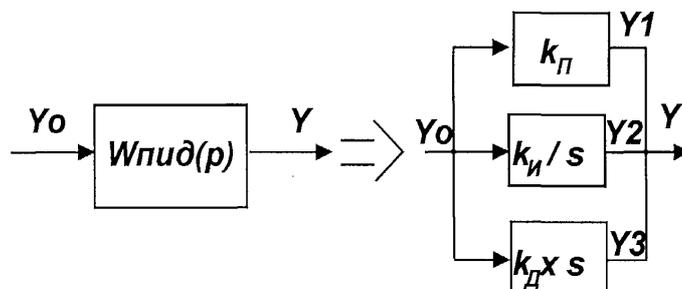


Рисунок 3 – Передаточная функция звена ПИД

Для математического описания ШИМ воспользуемся классическим представлением структуры импульсного модулятора на примере модели частотно-импульсного модулятора (ЧИМ) [3].

Как известно, частотно - импульсная модуляция предполагает изменение частоты следования импульсов в линейном соответствии с модулирующим воздействием.

При этом частота следования импульсов понимается как мгновенная частота колебаний синусоидальных частотно - модулированных колебаний, у которых фазовые значения

$$\varphi_n = \varphi_0 + 2\pi n, \varphi = const, n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

совпадают с моментами  $t_n$  появления импульсов.

Скорость изменения фазы модулируемого вектора  $u$  изменяется в линейном соответствии с внешним воздействием  $x(t)$  точно так же, как и в случае непрерывной модуляции гармонического сигнала.

Структура ЧИМ представлена на рисунке 4. Она представляет собой последовательное соединение интегрирующего звена, нелинейного элемента квантования приращений (шаг дискретизации) и формирователя прямоугольных импульсов. Формирователь импульсов преобразует промодулированные  $\delta$  - импульсы в импульсы заданной формы.

Для весьма распространенного случая, когда формируются прямоугольные импульсы (длительностью  $\gamma$ ), передаточная функция формирователя имеет вид

$$W_\phi(s) = \frac{(1 - e^{-s\gamma})}{s} \quad (3)$$

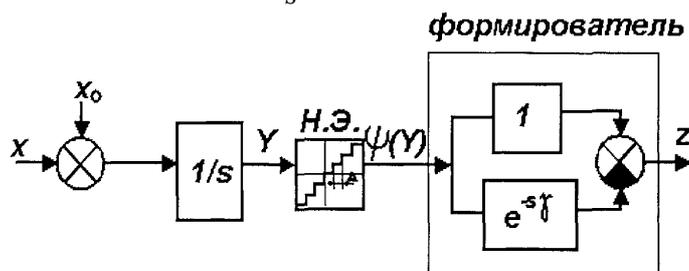


Рисунок 4 – Структура ЧИМ

Проведем аналогичное построение структуры ШИМ – модулятора с учетом применения ШИМ в качестве управляющего звена в ИУС АБП АО.

Для этого используем также геометрическую интерпретацию, но в отличие от ЧИМ представим параметры ШИМ в виде скалярных функций, что, во-первых, существенно облегчит понимание процесса преобразования, во-вторых, значительно упростит подход к практической реализации алгоритма управления в микропроцессорной ИУС.

На рисунке 5 представлена такая интерпретация ШИМ.  $U(t)$  представляет собой последовательность пилообразных импульсов с вертикальным задним фронтом.

Математически такая функция описывается

$$U(f) = af - u1,$$

$U(f)$  – функция, разрывная в точках  $T \cdot n$ ,

где  $f = \frac{t}{n}, (n = 1, 2, \dots)$ ,

$a$  – коэффициент пропорциональности, определяющий угол наклона графика зависимости  $U(t)$ ,

$T$  – период следования импульсов.

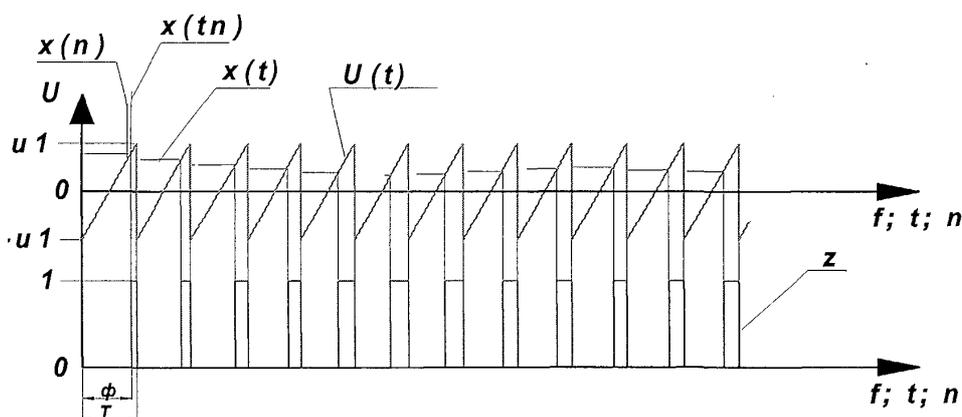


Рисунок 5 – Построение структуры ШИМ

Для определения фазы переднего фронта  $\varphi(t_n) \in \{0; T\}$  необходимо выполнение условия

$$U(t_n) = x(t_n),$$

тогда

$$\varphi(t_n) = [x(n) + u1] / a, \tag{4}$$

По аналогии с ЧИМ получим уравнение, определяющее моменты времени  $t_n$  появления модулированных импульсов:

$$\omega_0 t_n = 2\pi n + \varphi(t_0) + \varphi(t_n)$$

или

$$\omega_0 t_n - [x(t_n) + u1] / a = 2\pi n + \varphi(t_0). \tag{5}$$

Из геометрической интерпретации и уравнения (5) вытекает структурная схема ШИМ (рис. 6).

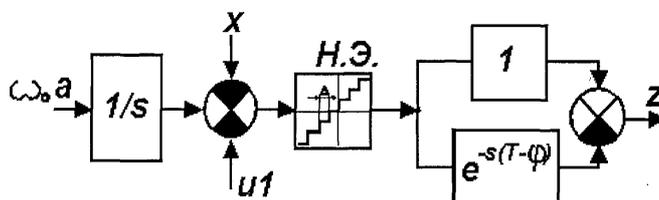


Рисунок 6 – Структурная схема ШИМ

На вход подается сигнал  $\omega_0 a$ , определяемый несущей частотой следования импульсов ШИМ и наклоном графика зависимости  $U(t)$ .

Очевидно, что при заданной постоянной частоте ШИМ  $a$  зависит от выбранного значения  $u1$ , что, в свою очередь определяется выбранным шагом дискретизации - величиной кванта нелинейного элемента  $\Delta = 2\pi n \cdot a$ . Другими словами, чем меньше шаг дискретизации, тем больше значение параметра  $u1$ .

Исходя из вышеизложенного, получим обобщенную структуру математической модели ИУС АБП АО, приведенную на рисунке 7.

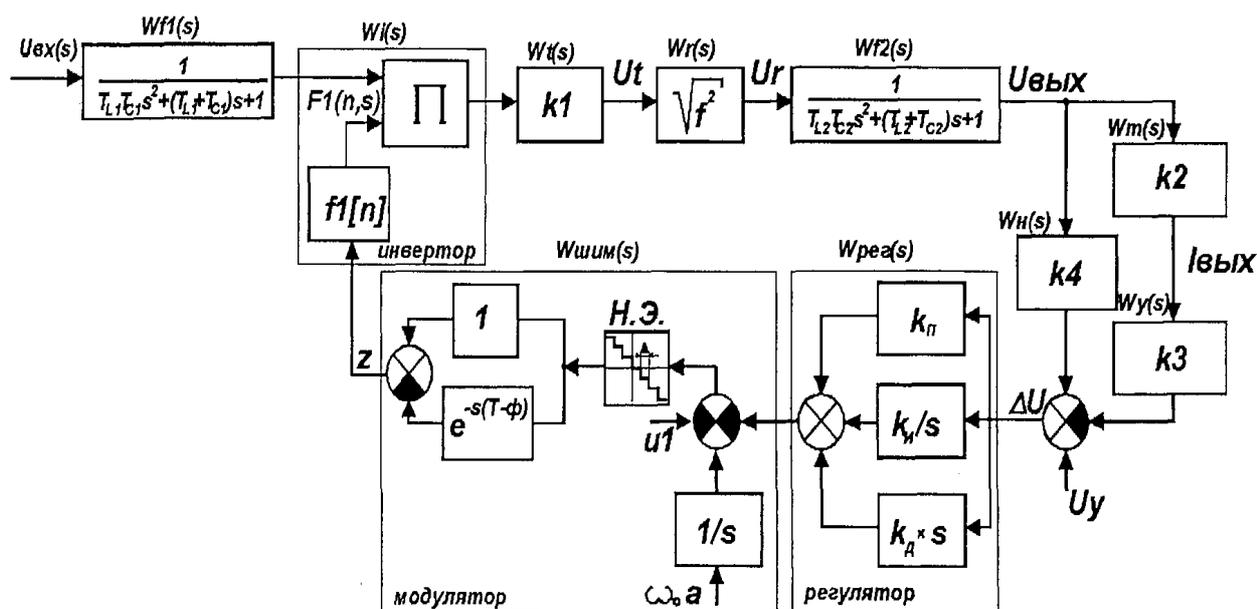


Рисунок 7 – Обобщенная структура математической модели ИУС АБП АО

Передаточная функция  $Wf1(s)$ , как отмечалось выше, определяет влияние динамических процессов во входной сети, при учете скачков и провалов напряжения  $U_{ex}$ ,  $U_f(s)$  – напряжение на выходе входного фильтра ( $Wf1(s)$ );  $U_i(s)$  – напряжение на выходе инвертора  $W_i(s)$ ;  $F_1(n)$  – знакопеременные импульсы напряжения единичного значения на входе инвертора, по длительности соответствующие импульсам ШИМ;  $U_r(s)$  – напряжение на выходе выпрямителя  $W_r(s)$ ;  $U_{вых}(s)$  – выходное напряжение АБП;  $z(s)$  – импульсы управления инвертором на выходе ШИМ;  $U_{mod}(s)$  – напряжение на выходе ПИД – регулятора с коэффициентами  $k_{П}$ ,  $k_{И}$ ,  $k_{Д}$ ;  $W_{нл}$  – передаточная функция нелинейного элемента, характеристика НЭ определяет шаг дискретизации (горизонтальная ступень) и амплитуду импульсов (вертикальная ступень);  $T_L, T_C$  – постоянные времени фильтров, определяемые реактивными параметрами,  $T$  – период следования импульсов,  $\omega_0$  – частота следования импульсов,  $U_y$  – уровень уставки напряжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов, В.В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем: моделирование для исследования специальных режимов [Текст] / В.В. Краснов, П.А. Мещанинов, А.П. Мещанинов. - Л.: Судостроение, 1989. - 328 с.
2. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования [Текст] / А.С. Востриков, Г.А. Французова. - М.: Машиностроение, 2003. – 364 с.
3. Джури, Э. Импульсные системы автоматического регулирования [Текст] / Э. Джури. – М.: Физматгиз, 1963. - 456 с.

**Новиков Александр Анатольевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Аспирант

Тел. +7(499) 2694788

E-mail: vsleptsov@gmail.com

A.A. NOVIKOV

## WORKING OUT AND FORMATION OF STRUCTURE OF MATHEMATICAL MODEL OF INFORMATION-OPERATING SYSTEMS OF UNITS OF UNINTERRUPTED POWER SUPPLIES OF INDEPENDENT OBJECTS

*It is shown that at construction of mathematical model for the decision of the same problem at different stages it is expedient to change mathematical model, since the elementary model, and then its gradual complication for the account of the additional phenomena and communications which at the initial stage have been rejected as insignificant.*

*Taking into account it the function chart of the integrated static converter is developed for construction and the analysis of mathematical model of information-operating system independent object as a part of structure of the unit of uninterrupted power supplies information-operating system as basic making element uninterrupted power supplies. From the resulted functional structure the structure of mathematical model of the converter is defined.*

**Keywords:** *mathematical model; units of the uninterrupted power supplies; the information-operating system; the integrated static converter; independent object.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Krasnov, V.V. Osnovy teorii i rascheta sudovyh jelektrojenergeticheskikh sistem: modelirovanie dlja is-sledovaniya special'nyh rezhimov [Tekst] / V.V. Krasnov, P.A. Mewaninov, A.P. Mewaninov. - L.: Sudo-stroenie, 1989. - 328 s.
2. Vostrikov, A.S. Teorija avtomaticheskogo regulirovaniya [Tekst] / A.S. Vostrikov, G.A. Francuzova. - M.: Mashinostroenie, 2003. - 364 s.
3. Dzhuri, Je. Impul'snye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya [Tekst] / Je. Dzhuri. - M.: Fizmat-giz, 1963. - 456 s.

#### **Novikov Alexandr Anatol'evich**

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow

The post-graduate student

Тел. +7(499) 2694788

E-mail: vslepsov@gmail.com

## МОДАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АВТОПИЛОТА ВЫСОТЫ С ЧАСТИЧНЫМ ИСПОЛНЕНИЕМ В ВИДЕ ДРАЙВЕРА WINDOWS NT

*Рассмотрены основы модального синтеза систем автоматического управления, проведен модальный синтез автопилота поддержания высоты в Control System Toolbox, пакете расширения MATLAB. Часть полученного регулятора переведена на язык программирования Си и исполнена в виде драйвера Windows NT.*

**Ключевые слова:** модальный синтез; автопилот; MATLAB; Simulink; Control System Toolbox; Real-Time Workshop; драйвер Windows NT.

Известно, что отрицательная обратная связь по какой-либо координате объекта управления (ОУ) стабилизирует эту координату, то есть в той или иной мере поддерживает её постоянной при неизменном задании и наличии возмущений внутри контура. Поэтому можно полагать, что если замкнуть ОУ по всем координатам, характеризующим его состояние в любой момент времени и называемыми переменными состояния, то при соответствующем подборе коэффициентов обратных связей можно получить желаемые характеристики ОУ относительно выходных координат. Такое управление называется модальным [1], показано на рисунке 1.

Вспомним математическое описание линейной системы с модальным управлением. ОУ описывается системой дифференциальных уравнений (1) в форме Коши:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + b_{i1}u_1 + \dots + b_{im}u_m, \quad \text{где } i=1, \dots, n; \quad (1)$$

плюс уравнения выходов:  $y_j = c_{j1} \cdot x_1 + c_{j2} \cdot x_2 + \dots + c_{jn} \cdot x_n, \quad \text{где } j=1, \dots, r; \quad (2)$

плюс уравнения модального регулятора:  $U_{pj} = k_{j1} \cdot x_1 + k_{j2} \cdot x_2 + \dots + k_{jn} \cdot x_n, \quad \text{где } j=1, \dots, m; \quad (3)$

и уравнения замыкания для ОУ:  $U_j = V_j - U_{pj}, \quad \text{где } j=1, \dots, m; \quad (4)$

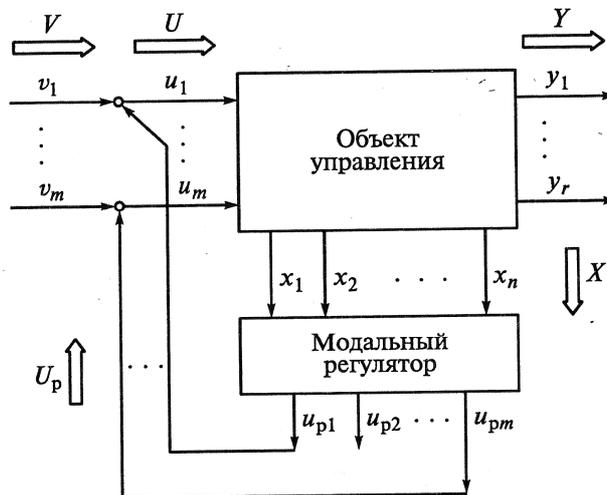


Рисунок 1 – Общий вид системы с модальным управлением

Описание системы с модальным управлением  $n + r + m$  уравнениями более компактно представляется в векторно-матричной форме, система уравнений (5), или графически рисунок 2 (матрица обхода  $D$  не показана) [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} X'(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t), \\ Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t), \\ U_p(t) = K \cdot X(t), \\ U(t) = V(t) - U_p(t). \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $A$  – квадратная матрица объекта управления, размерности  $n \times n$ ,  $A=[ a_{ij} ]$ ;  
 $B$  – прямоугольная матрица управления ( $n \times m$ ),  $B=[ b_{ij} ]$ ;  
 $C$  – прямоугольная матрица выходов ( $r \times n$ ),  $C=[ c_{ij} ]$ ;  
 $D$  – прямоугольная матрица обхода ( $r \times m$ ),  $D=[ d_{ij} ]$ ;  
 $K$  – прямоугольная матрица модального регулятора ( $m \times n$ ),  $K=[ k_{ij} ]$ .

Конечно, в случае единственного управляющего воздействия происходит значительное упрощение системы уравнений: матрицы  $B, D, K$  – превращаются в векторы. Упрощение происходит и в случае единственности выхода: матрицы  $C, D$  – превращаются в векторы.

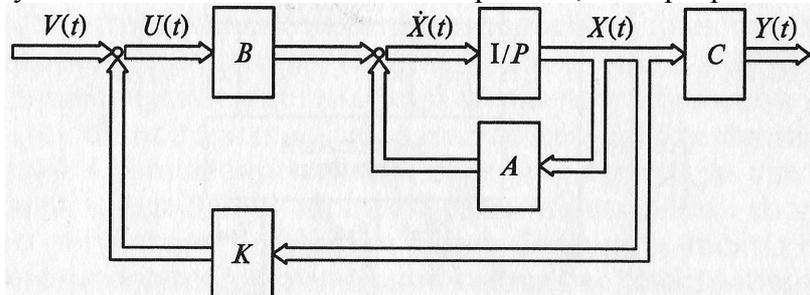


Рисунок 2 – Векторно-матричная схема системы модального управления

Известно, что применительно к сложным объектам управления с высоким порядком  $n$  характеристического полинома, для которых модальное управление оказывается наиболее эффективным, требуется  $n$  датчиков для построения модального регулятора. В составе системы управления датчики, особенно электромеханические, являются дорогими устройствами. Кроме того, не все переменные состояния могут быть доступны непосредственному измерению. Поэтому для практической реализации модального регулятора труднодоступные измерению переменные состояния выделяются косвенным способом, с помощью наблюдателей [1]. Наблюдатель представляет собой математическую модель всего ОУ или его части, которая работает в реальном времени. Объект управления замыкается по вектору состояния, оцененному наблюдающим устройством, рисунок 3.

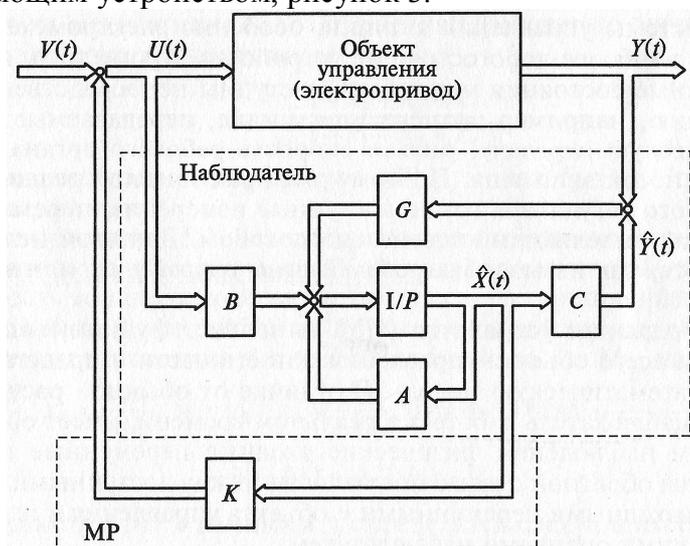


Рисунок 3 – Векторно-матричная схема с наблюдающим устройством

Синтез модальной системы управления будем проводить с помощью System Control Toolbox, пакета расширения MATLAB. System Control Toolbox составлен из множества .m файлов – готовых команд для системы MATLAB по анализу и синтезу систем управления, а также нескольких вспомогательных утилит.

Создадим автоматическую систему поддержания заданной высоты полета самолета (автопилот высоты) [2]. Движение самолета в установившемся режиме полета описывается уравнением 5-ого порядка с фазовыми координатами:

- 1)  $q$  – скорость изменения угла тангажа;
- 2)  $\theta$  – угол тангажа;
- 3)  $h$  – высота полета.
- 4)  $u$  – скорость самолета в направлении продольной оси фюзеляжа;
- 5)  $w$  – скорость самолета в направлении оси, перпендикулярной к фюзеляжу и направленной вниз;

Управляющее воздействие – угол отклонения руля высоты  $\delta_e$  [2], рисунок 4.

Для моделирования воспользуемся параметрами самолета Боинг-747, летящего со скоростью 0,8 скорости звука, на высоте 7000 м при полетной массе около 300 т. В уравнениях в качестве линейной меры принят фут. Для выбора параметров регулятора (матрицы усиления  $K$  с 6-ю входами и одним выходом) воспользуемся методом размещения полюсов. Наблюдатель принимает первые 3 выхода от ОУ:  $q$  – измеряется гироскопом,  $\theta$  – авиагоризонтом,  $h$  – барометрическим высотомером.

*Листинг 1 – файл avtopilot.mat (либо avtopilot.m)*

```
A = [ -0.0064    0.026    0   -32    0;
      -0.094   -0.62   820    0    0;
      -0.00022 -0.0015  -0.67  0    0;
       0        0        1    0    0;
       0       -1        0   830  0];
```

```
B=[0; -32.7; -2.08; 0; 0];
```

```
C = [ 0 0 1 0 0;
      0 0 0 1 0;
      0 0 0 0 1];
```

```
D=zeros(3, 1);
```

```
SAMOLET = ss(A, B, C, D);           %образование системы, описывающей Об. Упр.
```

```
A_aug = [ zeros(1,5) -1;          %расширение матрицы «фиктивного» ОУ
          zeros(5,1) A ];        %новым состоянием, примененное для расчета регулятора K
```

```
B_aug=[ 0;                        %добавочное состояние,  $dx_1/dt=-h$ , выход интегратора придает
        B ];                       %астатизм, устраняющий статич. ошибку регулиров. высоты
```

```
p = 0.9 * [-0.005, -0.15, -1+1.5i, -1-1.5i, -2.2+3i, -2.2-3i]; %назначим полюса для K
```

```
K = place( A_aug, B_aug, p );      %вычислим матрицу регулятора K
```

```
pe = 2 * [-0.15, -1, -1.5, -2.2+3i, -2.2-3i];                    %назначим полюса для наблюдателя L
```

```
At = A'; Ct = C';                                                    %транспонирование
```

```
L_do_Tr = place( At, Ct, pe ); L = L_do_Tr';                          % вычислим наблюдатель L
```

```
ESTIMATOR = estim( SAMOLET, L, [1 2 3], [1]); %подключим наблюдатель к объект управ.
```

```
[Ae, Be, Ce, De] = ssdata( ESTIMATOR); %извлечение матриц из расширенной системы
```

```
se = eig(Ae); %вычислим собственные значения матрицы
```

```
save('avtopilot.mat'); %сохраним рабочую среду MATLAB (проведенные вычисления)
```

```
sim('avtopilot.mdl'); %загрузим модель Simulink, использующую вычисленные значения
```

```
t = SD1( :, 1 ); plot( t, SD1( :, 2), 'k-'); grid; figure(2);
```

```
t = SD ( :, 1 ); plot( t, SD ( :, 2), 'k-', t, SD( :, 3), 'k--'); grid
```

Рисунок 4 показывает модель, созданную в Simulink для отработки задания по увеличению высоты полета на 100 футов. В параметрах блока SAMOLET указаны переменные A, B, C, D. В параметрах блока ESTIMATOR указаны переменные Ae, Be, Ce, De. Блок REGULATOR настроен на матричное вычисление произведения, параметром задано K. В блоке U задано числовое значение 180/3,1415 (для измерения в градусах). Через меню File→Model Properties→Callbacks→Init Fcn\* указана связь с вычислениями, проведенными и сохраненными из рабочей среды MATLAB, фразой load avtopilot.mat.

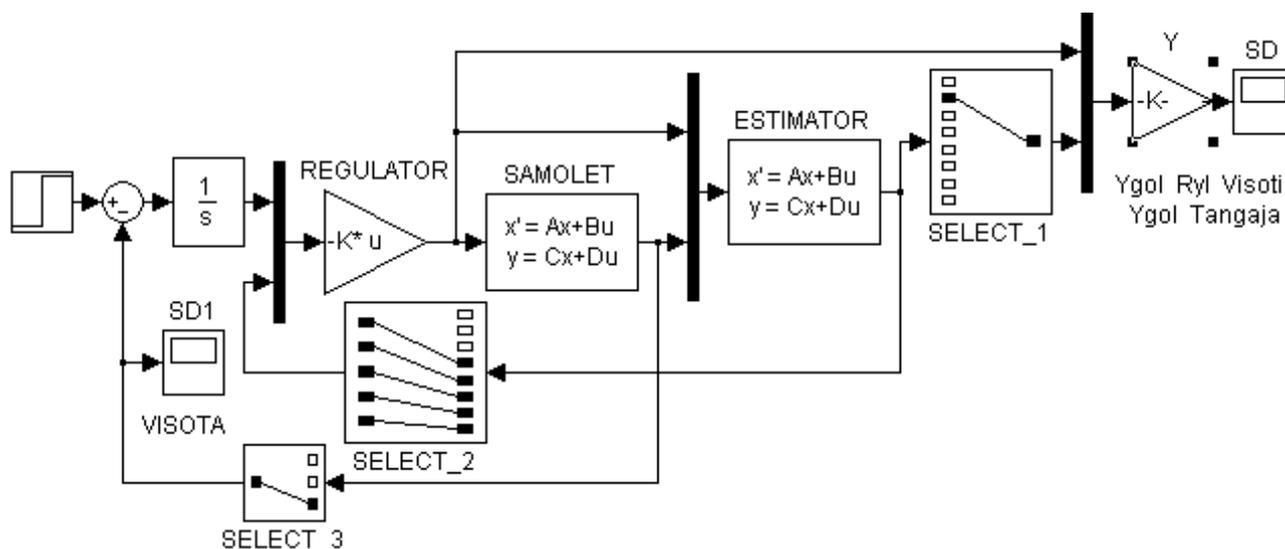


Рисунок 4 – Модель регулирования высоты полета

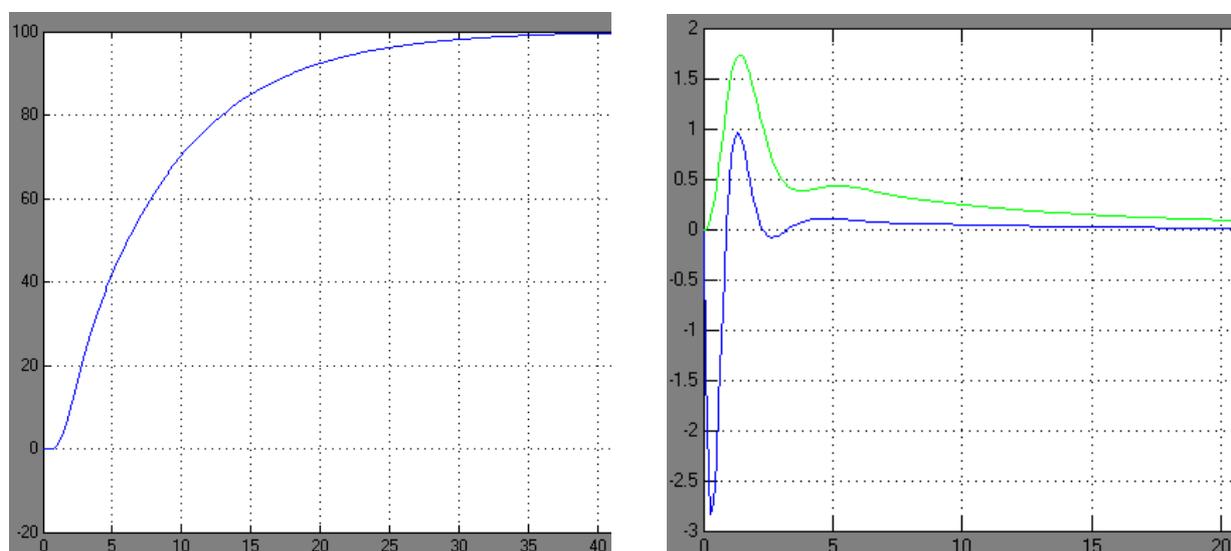


Рисунок 5 – Слева увеличение высоты  $h$  на 100 футов; справа управление через руль высоты  $\delta\epsilon$  (отрицательные углы) и изменение угла подъема носа самолета  $\theta$  (в градусах)

Щелчком мышкой на блоке REGULATOR, для его выделения (рис. 4), далее меню Edit→Create Subsystem создаем подсистему (рис.6). Далее из меню подсистемы Simulation→Configuration Parameters...выбираем пункт Real-Time Workshop.

Настраиваем:

- язык программирования Си;
- порождение только Си кода (без проекта);
- целевой файл управления компиляцией выбираем rtwin.tlc (Real-Time Windows Target – для систем реального времени с Windows).

С одной стороны решение создать элементы автопилота в виде драйвера для операционной системы (ОС) Windows обосновано тем, что ОС типа Windows NT оказывают серьезное давление на рынок ОС реального времени [4]. Это является проявлением общей тенденции роста вычислительной мощности компьютерных систем, с одновременным уменьшением их размеров, энергопотребления и стоимости. ОС Windows XP с пакетами обновлений SP2 и SP3 обладает очень высокой надежностью.

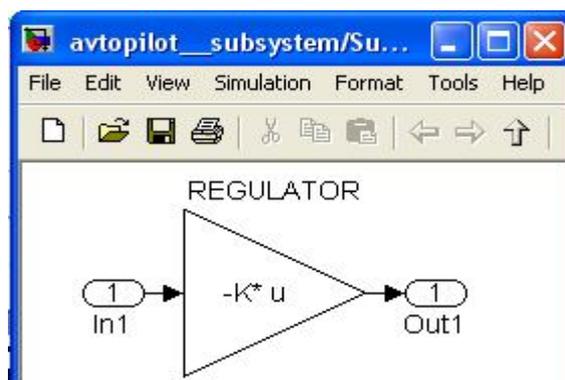


Рисунок 6 – Регулятор, выделенный в подсистему

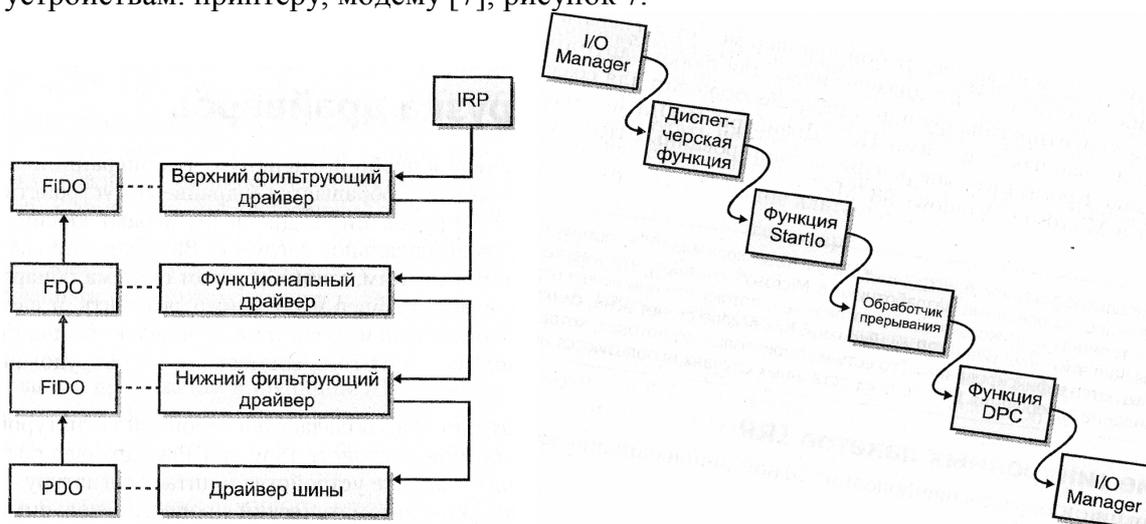
стью в работе, до сих пор очень популярна у пользователей, её разновидности, такие как Windows XP Embedded Standart 2009 активно применяются в консервативном секторе рынка информационных технологий – системах промышленной автоматизации, работающих в режиме «мягкого» реального времени. Фирма Microsoft проявляет усиленный интерес к встроенным системам и объявила о скором выпуске ОС реального времени Microsoft At Work [4].

С другой стороны, необходимо отметить, что система среднего и высшего образования в России по прежнему остается одной из лучших в мире. Для этого достаточно пролистать школьные учебники. Замечаем что английский язык, принятый за главный международный язык в науке и технике, зачастую изучается с 1-ого класса. Знакомство с информатикой начинается с 7-ого класса и в старших классах происходит освоение основ устройства ОС Windows и алгоритмического программирования на языке LOGO. Студенты младших курсов технических вузов как правило изучают универсальный язык программирования Си. Молодые специалисты уверенно работают с ОС Windows и способны оказывать техническую поддержку драйверам для ОС Windows, написанным на языке программирования Си, этот важный фактор необходимо принимать во внимание.

Двойственность природы драйвера для ОС типа Windows проявляется в том, что:

- это программа для управления аппаратурой от громоздких внешних устройств до отдельных частей внутри микросхем чипсета персонального компьютера (ПК);
- это возможность неограниченного доступа к богатым функциональным возможностям защищенного ядра ОС Windows (свыше 1000 функций). Например, доступ к портам ввода-вывода аппаратуры в ОС Windows XP разрешен только из драйвера [6]. Драйвер – набор функций для вызова из пользовательских программ.

Сложность поставленной практической цели обусловлена тем, что ОС Microsoft XP является многозадачной системой, где задачи вынуждены конкурировать за владение системными ресурсами и за владение процессором по сложной системе приоритетов. Внутри одной задачи возможен запуск нескольких потоков выполнения кода программы, работающих одновременно на нескольких процессорах современного ПК, что остро ставит проблему их синхронизации. Технология ACPI (Advanced Configuration and Power Interface – самонастройка устройств и развитое управление энергопотреблением), рекламное название которой Plug and Play «подключай и сразу заработает» основана на новой модели драйверов для ОС Windows – WDM (Windows Driver Model). В WDM, драйвера выстраиваются в цепочку – стэк, для обслуживания запросов ввода-вывода от Менеджера Ввода-Вывода ОС, к конкретным устройствам: принтеру, модему [7], рисунок 7.



**Рисунок 7 – Слева один из вариантов обработки – передачи IRP (пакета с запросом на ввод – вывод) от менеджера ввода-вывода ОС вниз к аппаратуре по стэку драйверов; справа одна из возможных последовательностей по обработке IRP внутри драйвера**

Основополагающее правило, руководство к действию – простота конструкции, как символ её надежности, заставляет нас выбрать «унаследованный» тип драйвера, тип NT, от ранних версий ОС Windows NT, которые могут не подключаться к стэку драйверов, работая «в одиночку». Аппаратной платформой послужит промышленный компьютер с двумя LPT портами фирмы Advantech, ARK-3381-2S4B1E [4].

По срабатыванию системного таймера ОС, обработчик прерывания драйвера уровня приоритета CLOCK\_LEVEL, будет принимать измерительные данные через порт LPT1, производить вычисления и выдавать управляющие сигналы через порт LPT2. Задающее воздействие для автопилота (программа полета) поставляется пользовательской программой, которая открывает драйвер, как устройство для записи. Сама программа читает данные из файла или получает их по радиоканалу, в ответ драйвер передает параметры полета для регистрации. Программа запускается перед полетом и записывает в драйвер с запасом сразу по 200 заданий, на 11 секунд полета. Задания (моменты времени) нумеруются, текущее отслеживается счетчиком внутри драйвера.

Допустим гипотетически (без проверки), правомочность замены непрерывного регулятора на дискретный. Вычисления проводятся над короткими 2-х байтовыми целыми числами, частота срабатывания системного таймера компьютера 55 миллисекунд. Пронормируем вектор регулятора,  $[K]^T = [0.0039 \ 0.0264 \ 0.0216 \ -2.55 \ -26.6 \ -0.0316]^T$  для применения в дискретной системе, с целью недопущения переполнения разрядной сетки коротких 2-х байтовых целых чисел, коэффициентом  $Z$ :

$$Z \leq 1 / ( \sum \text{abs}(K_i) = 1 / ( |K_1| \cdot Ts + |K_2| + |K_3| + |K_4| + |K_5| + |K_6| ) . \quad (6)$$

Выберем  $Z$  удобным для вычислений и с запасом  $Z=0,03$ . Расширяем регулятор по 1-ой переменной: поручая ему вычисление разности высот и интегрирование умножением полученной разности на интервал срабатывания системного таймера  $T_s$ . Код драйвера максимально упрощен (скелетный) для выделения основных моментов в его работе. Реализация аппаратной поддержки в виде электроники отсутствует для краткости.

*Листинг 2 – файл avtopilot.c*

```
#include <ntddk.h>
#define LPT_1 378h
#define LPT_2 278h
#define SYSTEM_CLOCK 28
#define Ts 0.0055
#define MY_IOCTL_WRITE_CODE ( FILE_DEVICE_UNKNOWN, 0x801, \
METHOD_BUFFERED, FILE_ANY_ACCESS )
#define NT_DEVICE_NAME L"\\Device\\Avtopilot"
#define DOS_DEVICE_NAME L"\\DosDevice\\Avtopilot"
#define Kn1 0.00012
#define Kn2 0.0079 //пронормированные коэффициенты
#define Kn3 0.0065 //их сумма по модулю меньше единицы
#define Kn4 -0.077 //что обеспечит защиту от переполнения операций
#define Kn5 -0.80 //в драйвере над короткими целыми (тип SHORT – 2 байта)
#define Kn6 -0.00095
typedef struct MY_DATA {SHORT SkYgTang, YgolTang, Visota, SkorGori, SkorVert} MyData, *PMYData;
typedef struct _MY_DEVICE_EXTENSION
{SHORT Zadanie[200]; MyData MyIsmer[200]; ULONG counterZadan; MY_KIRQL MyIRQL; PKINTERRUPT MyIntObj} MY_DEV_EXT, *PMY_DEV_EXT;

VOID Unload ( IN PDRIVER_OBJECT DriverObject) //завершение работы драйвера
{ UNICODE_STRING DosDeviceName;
RtlInitUnicodeString( &DosDeviceName, DOS_DEVICE_NAME );
```

```

IoDeleteSymbolicLink( &DosDeviceName);
IoDeleteDevice( DriverObject→DeviceObject );
}
NTSTATUS Open (IN PDEVICE_OBJECT MyDevice, IN PIRP Irp) //открытьОбменДанными
{ if ( counter == 0 ) { counter++; //защита от повторных попыток открытия устройства
    Irp→IoStatus.Status = STATUS_SUCCESS;
    IoCompleteRequest ( Irp, IO_NO_INCREMENT );
    return STATUS_SUCCESS; }
    else { Irp→IoStatus.Status = STATUS_ACCESS_DENIED;
    IoCompleteRequest ( Irp, IO_NO_INCREMENT );
    return STATUS_ACCESS_DENIED; }
}
NTSTATUS Close (IN PDEVICE_OBJECT MyDevice, IN PIRP Irp) //закрытьОбменДанными
{ counter--;
    Irp→IoStatus.Status = STATUS_SUCCESS;
    IoCompleteRequest ( Irp, IO_NO_INCREMENT );
    return STATUS_SUCCESS; //передача управления менеджеру ввода-вывода ОС
}
NTSTATUS IOcontrol ( IN PDEVICE_OBJECT MyDevice, IN PIRP Irp) //обменДанными
{ PMY_DEV_EXT dx = (PMY_DEV_EXT) MyDevice→DeviceExtension; //с пользовательск.
PIO_STACK_LOCATION IrpStack = IoGetCurrentIrpStackLocation(Irp); //программой или
UCHAR *InpBuff = IrpStack→Parameters.DeviceIoControl.InputBuffer; //радиоканалом
UCHAR *OutBuff = IrpStack→Parameters.DeviceIoControl.OutputBuffer;
{ KeAcquireInterruptSpinLock( &dx→MyIntObj );
RtlCopyMemory( InpBuff, &dx→Zadanie, sizeof( 200 * SHORT ) );
RtlCopyMemory( dx→MyIsmer, OutBuff, sizeof(MyData+ULONG));
counterZadan = 0;
KeReleaseInterruptSpinLock( &dx→MyIntObj ); } //разрешить прерывания от систем. таймера
    Irp→IoStatus.Information = 804;
    Irp→IoStatus.Status = STATUS_SUCCESS;
    IoCompleteRequest ( Irp, IO_NO_INCREMENT );
    return STATUS_SUCCESS;
}
BOOLEAN MyIsr (IN PKINTERRUPT pIntObj, IN PVOID pMyContent) //обработчик
{ PDEVICE_EXTENSION DeEx = (PDEVICE_EXTENSION) pMyContent; //прерывания
    ULONG currentCounter = DeEx→counterZadan; //системного
    SHORT currentZadanie = DeEx→Zadanie[currentCounter]; //таймера
    PVOID priem = DeEx→MyIsmer[currentCounter];
for ( SHORT i = 1; i<=10; i++) { __asm { mov dx, LPT_1
                                        in dx, al
                                        mov BYTE PTR priem, al }
    KeStallExecutionProcessor(2);
    priem++;
}
PMyData Izm = (PMyData) priem;
SHORT naLPT2 = Ts * Kn1 * (currentZadanie - Izm→Visota) + Kn2 * Izm→SkYgTang + Kn3 *
Izm→YgolTang + Kn4 * Izm→Visota + Kn5 * Izm→Skor.Gori + Kn6 * Izm→SkorVert ;
__asm { mov ax, naLPT2
        mov dx, LPT_2
        out dx, al }
KeStallExecutionProcessor(2); //простой процессора 2 микросекунды
__asm { mov ax, naLPT2

```

```

        mov dx, LPT_2
        mov al, ah
        out dx, al }
KeStallExecutionProcessor(2);    //простой процессора 2 микросекунды
DeEx→counterZadan++;
return FALSE;    //для передачи управления остальным обработчикам IRQ0 в цепочке
}
NTSTATUS DriverEntry(IN PDRIVER_OBJECT DriverObject, IN PUNICODE_STRING Reg)
{
    PDEVICE_OBJECT DeviceObject;    //операционная система вызывает эту
    PDEVICE_EXTENSION DeviceExt;    //функцию при запуске драйвера
    UNICODE_STRING NtDeviceName;
    UNICODE_STRING DosDeviceName;
    NTSTATUS status;

    RtlInitUnicodeString (&NtDeviceName, NT_DEVICE_NAME );
    status = IoCreateDevice ( DriverObject, sizeof ( MY_DEV_EXT ), &NtDeviceName,
        FILE_DEVICE_UNKNOWN, 0, FALSE, &DeviceObject);
    If ( !NT_SUCCESS (status)) { IoDeleteDevice( DeviceObject ); return status; }

    RtlInitUnicodeString (&DosDeviceName, DOS_DEVICE_NAME );
    status = IoCreateSymbolicLink (&DosDeviceName, &NtDeviceName );
    If ( !NT_SUCCESS (status)) { IoDeleteSymbolicLink (&DosDeviceName );
        IoDeleteDevice( DeviceObject ); return status; }
    DeviceExt = (PDEVICE_EXTENSION) DeviceObject→DeviceExtension;

    DeviceObject→Flags = DeviceObject→Flags & ( ~DO_DEVICE_INITIALIZING );
    DeviceObject→Flags = DeviceObject→Flags | DO_BUFFERED_IO;

    DriverObject→MajorFunction [ IRP_MJ_CREATE ] = Open;
    DriverObject→MajorFunction [ IRP_MJ_CLOSE ] = Close;
    DriverObject→MajorFunction [ IRP_MJ_DEVICE_CONTROL ] = IOcontrol;
    DriverObject→DriverUnload = Unload;
    status = IoConnectInterrupt( &DeviceExt→MyIntObj, MyIsr, DeviceExt, NULL, IRQ0, SYS-
        TEM_CLOCK, SYSTEM_CLOCK, Latched, TRUE, kAffinity, FALSE);
    return status;
}

```

Компиляцию и сборку драйвера произведем утилитой Build, входящей в состав пакета разработчика драйверов Windows NT DDK, фирмы Microsoft. Утилита Build требует 2 файла описания проекта [6]:

- универсальный, общий для всех проектов Makefile;
- индивидуальный, настроенный Source.

*Листинг 3 – файл Source*

```

TARGETNAME=Avtopilot
TARGETTYPE=DRIVER
TARGETPATH=obj
SOURCES=avtopilot.c

```

Для установки (включения) драйвера в работу ОС Windows XP внесем изменения в Системный Реестр. Откроем его программой regedit. Затем импортируем кодированный в Юникоде, подготовленный нами файл Avtopilot.reg.

*Листинг 4 – файл Avtopilot.reg*

```

[HKEY_LOCAL_MACHINE\System\CurrentControlSet\Services\Avtopilot]
"ErrorControl"=dword:00000001    ;игнорировать ошибки при запуске, выводить сообщения
"Type"=dword:00000001            ;драйвер режима ядра ОС

```

“Start”=dword:00000002 ;загрузка и запуск после старта ядра ОС  
 “ImagePath”=”\\SystemRoot\\System32\\Drivers\\Avtopilot.sys”

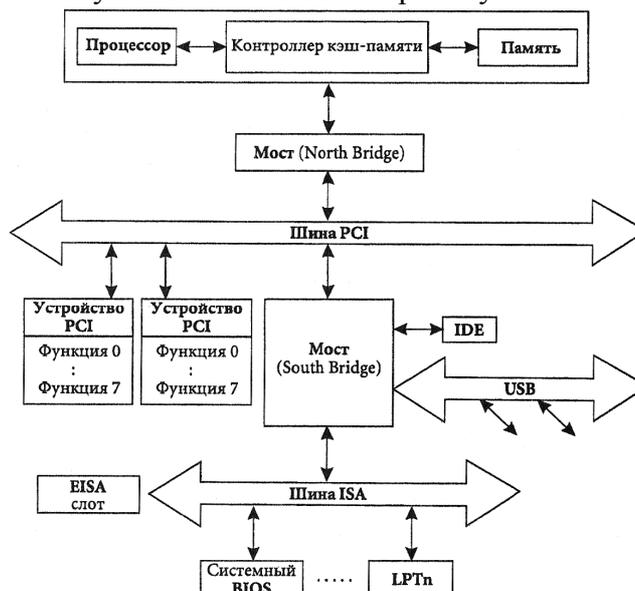


Рисунок 8 – расположение устройств LPTn по отношению к внутренним шинам ПК

Драйвер Avtopilot.sys работает с параллельными портами промышленного компьютера совместно со стандартным драйвером ОС Windows XP. Стандартный драйвер LPTn портов необходим только в момент старта ОС, для сложной инициализации по встраиванию аппаратуры в иерархию шин компьютера [7], рисунок 8. В дальнейшем, обращаться к LPTn портам из других программ строго запрещается, с ними будет работать исключительно стартовый после загрузки ядра ОС драйвер avtopilot.sys.

Запустим системный апплет Пуск – Панель Управления – Система – Оборудование – Диспетчер Устройств – Свойства Порт Принтера. Выставим или проверим правильность установленных адресов портов LPT1=378h, LPT2=278h и режима работы без прерываний.

В итоге осуществлена цепочка «сквозной» компьютеризованной разработки элементов модального регулятора автопилота: от синтеза математической модели до программы в виде драйвера, что должно служить одним из примеров освоения и внедрения передовых западных технологий в отечественную практику проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов [Текст] / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – 3-е изд. – М. : Академия, 2005. – 298 с.
2. Перельмутер, В.М. Пакеты расширения Matlab. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox [Текст] / В.М. Перельмутер. – М. : Солон-Пресс, 2008. – 221 с.
3. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления [Текст] / Е.И. Юревич. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 540 с.
4. Кангин, В.В. Аппаратные и программные средства систем управления. Промышленные сети и контроллеры [Текст] / В.В. Кангин, В.Н. Козлов. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 418 с.
5. Магда, Ю.С. Компьютер в домашней лаборатории [Текст] / Ю.С. Магда. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 197 с.
6. Солдатов, В.П. Программирование драйверов Windows [Текст] / В.П. Солдатов. – 2-е изд. – М. : БИНОМ, 2004. – 480 с.
7. Уолтер Они. Использование Microsoft Windows Driver Model [Текст] / Уолтер Они. – 2-е изд. – СПб. : Питер-Пресс, 2007. – 763 с.

**Горленко Сергей Владимирович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Аспирант

E-mail: sergylad4321@rambler.ru

S.V. GORLENKO

## THE MODAL SYNTHESIS OF HEIGHT AUTOPILOT PARTLY REALIZED INTO WINDOWS NT DRIVER

*The elements of modal synthesis for control system presented. The modal synthesis of height keeping autopilot made with Control system Toolbox assistance, which is MATLAB expansion. The got governer partly translated into programming language C and it fulfilled at driver Windows NT representation.*

**Keywords:** modal synthesis; autopilot; MATLAB; Simulink; Real-Time Workshop; Control System Toolbox; driver Windows NT.

### BIBLIOGRAPHY

1. Terehov, V.M. Sistemy upravlenija jelektroprivodov [Tekst] / V.M. Terehov, O.I. Osipov. – 3-e izd. – M. : Akademija, 2005. – 298 s.
2. Perel'muter, V.M. Pakety rasshirenija Matlab. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox [Tekst] / V.M. Perel'muter. – M. : Solon-Press, 2008. – 221 s.
3. Jurevich, E.I. Teorija avtomaticheskogo upravlenija [Tekst] / E.I. Jurevich. – 3-e izd. – SPb. : BHV–Peterburg, 2007. – 540 s.
4. Kangin, V.V. Apparatnye i programmnye sredstva sistem upravlenija. Promyshlennye seti i kon-trollery [Tekst] / V.V. Kangin, V.N. Kozlov. – M.: BINOM. Laboratorija znaniy, 2010. – 418 s.
5. Magda, Ju.S. Komp'juter v domashnej laboratorii [Tekst] / Ju.S. Magda. – M. : DMK Press, 2008. – 197 s.
6. Soldatov, V.P. Programmirovanije drajverov Windows [Tekst] / V.P. Soldatov. – 2-e izd. – M. : BI-NOM, 2004. – 480 s.
7. Uolter Oni. Ispol'zovanie Microsoft Windows Driver Model [Tekst] / Uolter Oni. – 2-e izd. – SPb. : Piter-Press, 2007. – 763 s.

#### **Gorlenko Sergey Vladimirovich**

Moscow state university of instrument making and informatics, Moscow

Post-graduate student

Tel: +7(910)6000633

E-mail: sergvlad4321@rambler.ru

# ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 620.172.2

С.Ф. КОРНДОРФ, И.Н. НИКУЛИНА

## **ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ ЭКЗОКАРПИЕВ ЯГОД НА РАСТЯЖЕНИЕ**

*Рассмотрены вопросы необходимости исследования прочности экзокарпиев ягод. Предложен способ определения размеров образца экзокарпия для испытаний на растяжение и отмечены особенности технологии его изготовления ввиду растительного происхождения данного материала.*

**Ключевые слова:** ягоды; экзокарпий; механические свойства; прочность; испытание на растяжение.

В нашей стране ввиду широкой распространённости, а также вкусовых предпочтений населения большим спросом в продаже пользуются ягоды чёрной смородины и крыжовника. При этом основные их производители удалены от главных потребителей, в том числе, перерабатывающих предприятий. Успешность сохранения товарных свойств указанных ягод и их доставки к месту назначения в пригодном для использования виде зависит от целого ряда факторов, среди которых важную роль играет соблюдение условий хранения ягод до доставки потребителю, поскольку этому предшествует ряд промежуточных этапов, которые на основании анализа обширного ряда информационных источников обобщённо представлены на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Операции, проводимые с ягодами вплоть до их конечной доставки до места реализации или переработки*

Многие исследователи сходятся во мнении, что механические свойства ягод характеризуют их пригодность для хранения [2, 3, 4]. При испытаниях механических свойств зрелую ягоду смородины или крыжовника можно принять за сферическую оболочку (экзокарпий), заполненную несжимаемым (по своим свойствам близким к жидкости)

содержимым. Таким образом, именно прочностные свойства экзокарпия, в частности его способность к растяжению, в основном обуславливают прочность ягоды при хранении и их изучение наиболее важно.

Целенаправленная селекция ягод, в том числе смородины и крыжовника, по параметру прочности непосредственно экзокарпия до сих пор не ведётся, так как нет специальных устройств для её определения и не выявлены те нагружения, которые испытывают экзокарпии ягод, находящихся в таре.

Товарность ягод чёрной смородины определяется согласно ГОСТ 6829-89 “Смородина черная свежая. Требования при заготовках, поставках и реализации”, а крыжовника - по ГОСТ 6830-89 “Крыжовник свежий. Требования при заготовках, поставках и реализации”.

В данных документах требования к механическим свойствам ягод оговариваются только косвенно, касательно допустимой механической повреждённости. Указанные требования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования стандартов к уровню допустимого содержания механически повреждённых ягод

Наименование показателя	Норма для товарного сорта	
	1-го	2-го
Содержание ягод перезревших и с механическими повреждениями (% от массы, не более)	Смородина чёрная свежая	
	2,0	4,0
Содержание ягод механически повреждённых (% от массы, не более): в местах отгрузки в местах назначения	Крыжовник свежий	
	3,0	5,0
	5,0	10,0

Согласно действующим стандартам высота загрузки тары не согласовывается с прочностью экзокарпия ягод. Указанными документами оговаривается лишь то, что толщина слоя ягод в каждой упаковочной единице не должна превышать 15 сантиметров для ягод смородины и 10 сантиметров для ягод крыжовника. Однако, высота слоя, выбранная произвольно, без учёта прочности экзокарпиев ягод, может служить как причиной неоправданного снижения товарных свойств ягод в результате их раздавливания, так и нерационального использования складских помещений из-за недостаточно эффективного использования тары. Также практика показывает, что, вероятнее всего, экзокарпий обладает ползучестью, следовательно, это также необходимо учитывать при нахождении ягод в таре.

Как во многих областях промышленности, так и в научных исследованиях давно и широко применяются методы испытаний различных материалов, в том числе, металлов, резин и пластмасс, на растяжение. Однако ещё в 1873 году немецкий учёный Швендерер отмечал невозможность прямого применения законов сопромата, которые были выведены на основании изучения сопротивления однородного упругого тела, для изучения растительных тканей [1]. Основными отличительными свойствами растительных тканей, по его заключению, являются следующие:

1. Растительные ткани характеризуются волокнистостью, неоднородностью и, как следствие, разной сопротивляемостью.
2. Растительные ткани, как живые, так и нет, значительно изменяют влажность, что оказывает большое влияние на их механическое сопротивление.
3. Растительные ткани обладают большой релаксацией, благодаря чему деформация при разрыве или изгибе зависит от быстроты нагружки.
4. У растительных тканей любые растягивающие усилия, даже незначительные, одновременно вызывают и упругие деформации, и остающиеся удлинения.

В данном контексте определение размеров образца экзокарпия для испытаний на растяжение и технологии его изготовления крайне важно, при этом нужно учитывать все перечисленные особенности растительных тканей.

Для проведения испытаний экзокарпиев ягод на растяжение брались ягоды чёрной смородины и крыжовника, каждая из которых разрезалась в направлении, перпендикулярном плоскости, проходящей через ось плодоножки таким образом, что в результате образовывался фрагмент ягоды, содержащий мякоть и экзокарпий, располагающиеся симметрично относительно поперечного диаметра ягоды. Далее производился поперечный разрез экзокарпия, его освобождение от мякоти и вырезание из него образца для проведения испытаний. Разрез целесообразно производить в месте расположения одного из прикрепляющих волокон, поскольку при удалении мякоти именно указанная зона экзокарпия наиболее подвержена повреждениям, что связано с необходимостью удаления частей волокон. Изготовление образца подобным способом обусловлено тем, что вырезанная данным образом полоска является относительно равнопрочной и имеет максимальную длину, что облегчает проведение эксперимента.

Ширина образца экзокарпия, используемого для испытаний, должна быть достаточной, для того, чтобы было возможно изготовить такую полоску, и в то же время, выбрана с учётом минимального влияния строения экзокарпия на результаты опыта.

Ширина образца экзокарпия, используемого для испытаний, рассчитывается следующим образом.

Ягоды определяются рядом геометрических параметров, в том числе:

$a$  – длина (высота) ягоды – наибольшая длина (высота), измеряемая по продольному осевому сечению, проходящему через ось плодоножки;

$b$  – меньший поперечный диаметр ягоды – минимальный диаметр ягоды в той же плоскости, в которой измеряют больший поперечный диаметр ягоды;

$c$  – больший поперечный диаметр ягоды – максимальный диаметр ягоды в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой измеряют длину (высоту) ягоды.

Поскольку в поперечном сечении образующая ягоды с достаточной степенью точности может быть по форме принята за эллипс, то, следовательно, её длина:

$$L = 4cE(e), \quad (1)$$

где  $E(e)$  – полный эллиптический интеграл 2 – го рода.

Приблизительно эта длина может быть вычислена по формуле:

$$L = 0,5\pi [1,5(b + c) - \sqrt{bc}]. \quad (2)$$

Длина образующей вырезанной полоски шириной  $h$  по её краю меньше, чем длина в большем поперечном сечении, так как диаметры соответствующего эллипса:

$$b' = \sqrt{b^2 - h^2}, \quad (3)$$

$$c' = \sqrt{c^2 - h^2}, \quad (4)$$

и, следовательно,

$$L' = 0,5\pi [1,5(b' + c') - \sqrt{b'c'}] \quad (5)$$

или

$$L' = 0,5\pi [1,5(\sqrt{b^2 - h^2} + \sqrt{c^2 - h^2}) - \sqrt{(b^2 - h^2)(c^2 - h^2)}]. \quad (6)$$

При испытаниях экзокарпия на растяжение необходимо учитывать, что края образующей растягиваются до её длины по большему поперечному сечению. При этом относительное удлинение составляет:

$$\xi = \frac{L - L'}{L}. \quad (7)$$

Подставив в данную формулу выраженные ранее  $L$  и  $L'$ , получим:

$$\xi = \frac{h^2 \left[ 0,75 \left( \frac{1}{c} + \frac{1}{b} \right) - 0,25 \sqrt{bc} \left( \frac{1}{c^2} + \frac{1}{b^2} \right) \right]}{[1,5(b+c) - \sqrt{bc}]} \quad (8)$$

Коэффициент формы вычисляется по формуле:

$$K = \frac{b}{c}, \quad (9)$$

при этом относительное удлинение можно выразить так:

$$\xi = \frac{h^2 \left[ 0,75 / b(1+K) - 0,25 \sqrt{bc} \left( \frac{1}{c^2} + \frac{1}{b^2} \right) \right]}{[1,5(b+c) - \sqrt{bc}]} \quad (10)$$

Если допустимая величина растяжения экзокарпия составляет 3 %, то при коэффициенте формы  $K = 0,86$ , что является средним значением величины, полученным по результатам ряда проведённых опытов, ширина подвергаемой испытанию на растяжение полоски кожицы ягоды равна:

$$h = \sqrt{\xi [1,5(1+K) - \sqrt{K}] / \left[ 0,75(1+K) - 0,25 \sqrt{1/K(K^2+1)} \right]}, \quad (11)$$

или в упрощённом виде:

$$h = 0,3c. \quad (12)$$

Для ягод, которые имеют незначительные различия меньшего и большего поперечных диаметров, к числу которых можно отнести и исследуемые ягоды чёрной смородины и крыжовника, допустимо произвольно измерять максимальный диаметр ягоды в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой измеряют высоту и, соответственно, принимать данное значение за  $c$ .

В ходе проведения экспериментов было установлено, что ввиду растительного происхождения экзокарпия, а, следовательно, его нестабильности как объекта исследования, необходимо учитывать следующие особенности данного материала:

1. При вырезании образца возможно его прилипание к режущей поверхности, образование надрывов, неровностей в местах разреза.
2. Различные участки испытуемого образца потенциально могут обладать разными прочностными свойствами.
3. Ягоде, отделённой от растения, свойственна дегидратация. При отделении экзокарпия особенно быстро дегидратируется та его часть, которая непосредственно соприкасалась с мякотью. Погружение образца в жидкость не является решением данной проблемы, поскольку неминуемо повлечёт изменение первоначальных механических свойств за счёт быстрой гидратации через устьица и осмотического давления в клетках.
4. Внешняя часть экзокарпия прочнее внутренней, которая к тому же имеет студенистый характер, поэтому закрепление образца в зажимах может сопровождаться проскальзыванием и разрушением экзокарпия.

Необходимо отметить, что испытаниям на растяжение можно подвергать только экзокарпий зрелых ягод, поскольку у зелёных ягод более твёрдый экзокарпий и он склонен к разламыванию при попытке его распрямить. Кроме того, экзокарпий незрелой ягоды с физической точки зрения мало отличается от мякоти, то есть в данном случае не играет ведущей роли в сохранении потребительских свойств ягод, находящихся в насыпи или подвергающихся другим сжимающим воздействиям.

Применение вышеприведённых выражений определения размеров образца экзокарпия для испытаний на растяжение и технологии его изготовления положены в основу метода испытаний экзокарпиев ягод на растяжение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вовк, П.Ф. Изучение физико-механических свойств растений в связи с конструированием сельскохозяйственных машин / П.Ф. Вовк // Труды ВИСХОМ . – М., 1935 - С. 32-39.
2. Иванова, Е.А. Химико-технологическая оценка качества ягод жимолости при замораживании, хранении и переработке: автореф. дисс. канд. техн. наук. СПб, 1995. - 16 с.
3. Коробкина, З.В. Хранение и перевозка винограда [Текст] / З.В. Коробкина, А.И. Кочурова - М.: Экономика, 1977. – 80 с.
4. Салманов, М.М. Влияние толщины кожицы ягод на механические свойства, транспортабельность и сохранность винограда при хранении / М.М. Салманов // Виноград и вино России – 1999. – № 4. – С. 27-28.

### **Никулина Ирина Николаевна**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Ведущий инженер управления качества и инновационных технологий в образовании

Тел. 89038824641

### **Корндорф Сергей Фердинандович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл

Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: pms@ostu.ru

---

S.F. KORNDORF, I.N. NIKULINA

## **FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF A TEST METHOD SKINS OF BERRIES ON THE TENSILE**

*The questions need to study the strength skins of berries. A method for determining the size of the sample of skin for tension and marked features of the technology of its manufacturing plant because of the material.*

**Key words:** berries; skin; mechanical properties; strength; tensile test.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Vovk, P.F. Izuchenie fiziko-mehaniicheskikh svojstv rastenij v svyazi s konstruirovaniem sel'skoho-zjajstvennyh mashin / P.F. Vovk // Trudy VISHOM . – М., 1935 - S. 32-39.
2. Ivanova, E.A. Himiko-tehnologicheskaja ocenka kachestva jagod zhimolosti pri zamorazhivanii, hrane-nii i pererabotke: avtoref. diss. kand. tehn. nauk. SPb, 1995. - 16 s.
3. Korobkina, Z.V. Hranenie i perevozka vinograda [Tekst] / Z.V. Korobkina, A.I. Kochurova - M.: Jekonomika, 1977. – 80 s.
4. Salmanov, M.M. Vlijanie tolwiny kozhicy jagod na mehanicheskie svojstva, transportabel'nost' i sohrannost' vinograda pri hranenii / M.M. Salmanov // Vinograd i vino Rossii – 1999. – № 4. – S. 27-28.

### **Nikulina Irina Nikolaevna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Lead engineer quality control and innovative technologies in education

Tel. 89038824641

### **Korndorf Sergey Ferdinandovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, professor, professor of department „Instrument engineering, metrology and certification”

Tel.: (4862) 41-98-76

E-mail: pms@ostu.ru

УДК 620.179.1.082.7.05

Е.В. ПАХОЛКИН, Е.В. АНЦИФОРОВА

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*В работе приведены результаты исследования смазывающей способности масел электрическими методами. Рассмотрены варианты выбора образцового метода. Приведен сравнительный анализ результатов, установлены качественные связи электрических параметров и показателей смачиваемости.*

**Ключевые слова:** смазывающая способность масел, экспериментальные зависимости, электрические методы трибомониторинга.

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях граничной смазки предотвращение изнашивания металлических поверхностей достигается за счет формирования на них адсорбированных слоев, называемых граничными. Свойства данных слоев зависят от состава смазочного материала (СМ) и свойств поверхностей трения. Определяющим свойством СМ в данном случае является смазывающая способность. В терминологии межмолекулярных взаимодействий данное свойство выражается в адгезионной и когезионной способности смазочной среды, которая обычно содержит различные поверхностно активные вещества.

В работе [1] дано описание экспериментальных исследований смазывающей способности масел с применением диагностических информационных параметров электрической группы – среднего электрического сопротивления и нормированного интегрального времени (НИВ) электрического микроконтактирования деталей трибосопряжения. Полученные в работе [1] результаты показывают возможность разработки метода оценки смазывающей способности СМ по электрическим параметрам работающего трибосопряжения, однако, такая разработка требует подтверждения достоверности метода, что может быть обеспечено комплексными исследованиями с применением образцового метода.

Анализ нормативных источников показал, что среди стандартизованных наиболее близкими являются методы, регламентированные ГОСТ Р ИСО 12156-1-2006 (Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Часть 1. Метод испытаний), ГОСТ Р 53715-2009 (Топлива авиационные для газотурбинных двигателей. Метод определения смазывающей способности на аппарате шар-цилиндр (BOCLE)), а также широко известный метод испытания с применением четырехшариковой машины трения (DIN 51 350, ASTM D 2266, ГОСТ 9490-75, РД 50-531-85). Аналогами данных методов являются также метод FZG (FZG lest. Four-square gear oil test), называемый также методом Нимана (Niemann test – CEC L-07-A-95, DIN 51 354, IP 334), Метод Тимкен EP (Timken Extreme Pressure Test – ASTM D 2782), метод Фалекс (Falex Pin and Vee Block Method – ASTM D 3233) и метод Алмен-Виланд, различающиеся применяемыми схемами трения.

Недостатками данных методов является то, что смазывающая способность определяется лишь косвенно по результатам оценки степени износа трибосопряжения. В частности, ГОСТ Р ИСО 12156-1-2006 в разделе 3 трактует смазывающую способность следующим образом: «Смазывающая способность: Свойство топлива, измеряемое пятном износа на металлическом шарике, которое образуется в результате трения металлического шарика о неподвижную металлическую пластину, полностью погруженную в топливо в точно определенных условиях испытания». При использовании четырехшариковой машины трения дополнительно исследуются критическая нагрузка, нагрузка сваривания и индекс задира. Очевидно, что смазывающая способность является лишь одним из многочисленных факторов, которые в совокупности определяют результаты испытаний названными методами, поэтому определе-

ние смазывающей способности в виде параметров износа деталей трибосопряжений является не вполне корректным.

Рассматривая смазывающую способность в таких понятиях, как адгезия и когезия, можно привести еще один термин, относящийся к рассматриваемому явлению, – «смачиваемость». Под смачиваемостью понимают процессы, происходящие при взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела и проявляющиеся в растекании жидкости и формировании площади адгезионного контакта. К основным показателям смачиваемости относят краевой угол и площадь капли. ГОСТ 745-2003 (Метод определения смачиваемости фольги) в качестве показателя смачиваемости предлагает также форму следа движения капли жидкости, нанесенной предварительно на горизонтальную поверхность с последующим ее наклоном (угол от 40 до 60°).

Следует отметить, что данный подход к определению качества адгезии СМ на металлических поверхностях также не является безупречным, так как обеспечивает оценку смазывающей способности в условиях, существенно отличных от условий фрикционного взаимодействия, тем не менее, является признанным, достоверным и наиболее простым в реализации, что и определяет его выбор.

### ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве образцов были использованы три вида масел: синтетическое масло класса 5W-30, моторное масло М-8 и минеральное И-20А. Для оценки смазывающей способности масел по электрическим параметрам была применена схема трения «вал – кольцо». Условия фрикционного взаимодействия (скорость скольжения и нагрузка) обеспечивали режим граничного трения с отсутствием гидродинамического несущего слоя.

Результаты исследования иллюстрируются рисунками 1 – 2.

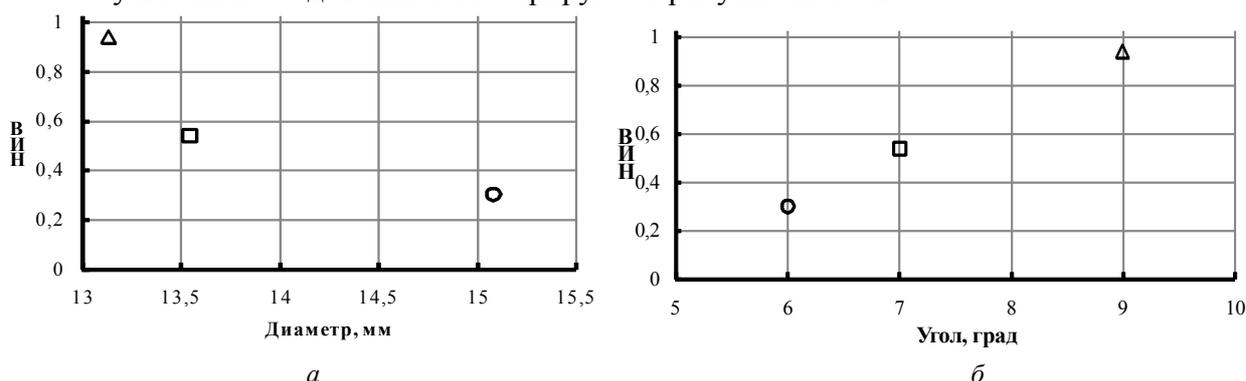


Рисунок 1 – Качественная зависимость НИВ от смазывающей способности, определенной по а – диаметру пятна пробы на поверхности металла; б – краевому углу пробы на поверхности металла

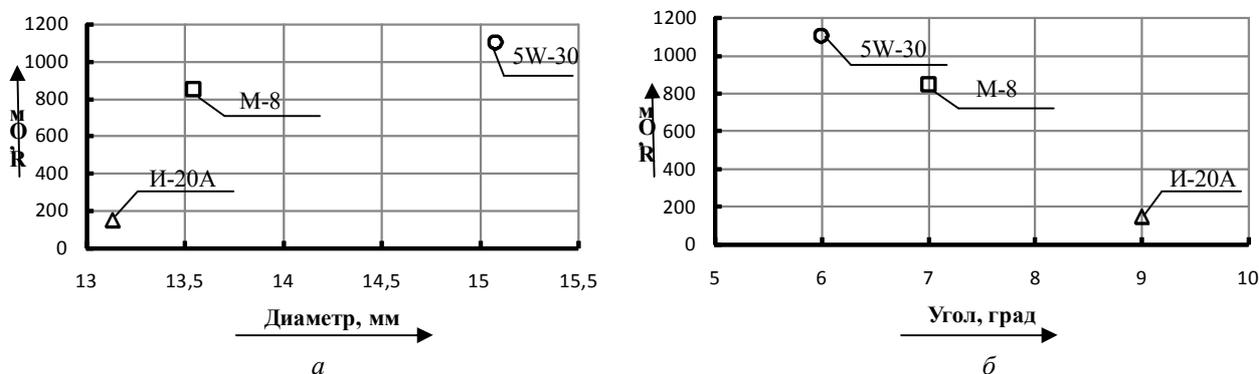


Рисунок 2 – Качественная зависимость сопротивления от смазывающей способности, определенной по а – диаметру пятна пробы на поверхности металла; б – краевому углу пробы на поверхности металла

Сопоставление результатов образцового метода и результатов измерения параметров «электрическое сопротивление» и НИВ позволило сделать следующие выводы:

– между диаметром пятна пробы масла на металлической поверхности и значением НИВ наблюдается монотонно убывающая зависимость;

– между значениями краевых углов капель СМ указанных видов и параметром НИВ наблюдается монотонно возрастающая зависимость (краевые углы определялись между поверхностью под каплей и касательной);

– между диаметром пятна пробы масла на металлической поверхности и значением сопротивления наблюдается монотонно возрастающая зависимость;

– между значениями краевых углов капель СМ указанных видов и сопротивлением наблюдается монотонно убывающая зависимость;

– значения параметра НИВ для масел выбранных типов (класса 5W–30, моторного М-8 и минерального И-20А) составили, соответственно, 0,3, 0,55 и 0,95, что соответствует теоретическим предположениям о возрастании данного параметра при снижении смазывающей способности СМ;

– значения параметра «электрическое сопротивление» для масел выбранных типов составили, соответственно, 1,1 кОм, 0,85 кОм и 0,15 кОм, что соответствует теоретическим предположениям об убывании данного параметра при снижении смазывающей способности СМ.

### **ВЫВОДЫ**

Анализ результатов показывает, что для масла И-20 с худшими смазывающими свойствами наблюдается максимальное значение параметра НИВ и минимальное значение сопротивления. Масло М-8 было использовано как промежуточный вариант, так как оно содержит минимальный набор функциональных присадок.

Наконец, синтетическое масло, обладая наилучшими возможностями по формированию граничных слоев, обеспечивает минимальное значение диагностического параметра НИВ и максимальное значение электрического сопротивления.

Полученные предварительные результаты позволяют рассматривать предложенный подход к оценке смазывающей способности СМ по электрическим параметрам как один из наиболее перспективных в силу простоты его технической реализации, простоты интерпретации результатов измерения диагностических параметров, сравнительно низкой стоимости технических средств. Немаловажным является также то, что предлагаемый метод позволяет оценивать смазочную способность СМ непосредственно в условиях фрикционного взаимодействия.

*Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”, код проекта 10423.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пахолкин, Е.В. Экспериментальные исследования смазывающей способности моторных масел электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 5 (283). – С. 125-128.

#### **Пахолкин Евгений Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс", г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 416684  
E-mail: Eugene\_P@bk.ru

#### **Анцифорова Елена Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс", г. Орел  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 419876  
E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

E.V.PAKHOLKIN, E.V. ANTSIFOROVA

## ESTIMATION OF RELIABILITY OF RESULTS OF RESEARCH OF LUBRICANT ABILITY OF MATERIALS BY ELECTRIC METHODS

*In work results of research of greasing ability of oils are resulted by electric methods. Variants of a choice of an exemplary method are considered. The comparative analysis of results is resulted, qualitative communications of electric parameters and wettability indicators are established.*

**Keywords:** oiliness of engine oils, experimental dependences, electric methods of tribomonitoring.

### BIBLIOGRAPHY

1. Pakholkin, E.V. Jeksperimental'nye issledovaniya smazyvajuwej sposobnosti motornyh masel jelek-tricheskim metodom [Tekst] / E.V. Pakholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnolo-gii. – 2010. – № 5 (283). – S. 125-128.

#### **Pakholkin Evgeniy Vasilyevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. (4862) 416684

E-mail: Eugene\_P@bk.ru

#### **Antsiforova Elena Vladimirovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. (4862) 419876

E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

С.Г. ПУЗЫРЕВ, С.Н. СЫЧЕВ, Е.В. ЧИРИКИН

## ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ВРЕМЕН УДЕРЖИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДСКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ПРИ ХОРОШЕМ И ПЛОХОМ РАЗРЕШЕНИИ

*В предлагаемой работе рассмотрен способ оценки статистической достоверности времен удерживания компонентов моторных масел, полученных методом жидкостной хроматографии. Были рассмотрены времена удерживания, полученные на двух разных образцах. В первом случае в качестве заполнителя хроматографической колонки выступали опилки гильзы цилиндра (чугун), во втором опилки поршня (алюминий). Данная оценка является основой для разработки метода определения адгезии методом жидкостной хроматографии.*

**Ключевые слова:** адгезия, хроматографическая колонка.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка достоверности времен удерживания, полученных методом жидкостной хроматографии, статистическими способами имеет свою специфику вследствие наличия физической (реальной) ширины пиков. При плохом разделении компонентов анализируемой смеси это приводит к взаимному перекрыванию пиков. В этом случае наблюдается значительное ухудшение достоверности определения положения вершин пиков, по которым определяются времена удерживания. В представленной работе описана процедура повышения достоверности определения времен удерживания, при любом качестве разделения. Следует отметить, что при однопараметровом режиме детекции решение этой задачи принципиально невозможно.

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ХОРОШЕМ И ПЛОХОМ РАЗРЕШЕНИИ

В ходе проведения серии экспериментов были получены данные времен удерживания веществ пробников на хроматографической колонке заполненной опилками чугуна, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента (времена удерживания хроматографической колонки 80x2 мм, заполненной опилками чугуна)

Номер анализа, №	Бензол	Толуол	Анилин	Хлор-бензол	Бром-бензол	Нитро-бензол	Бифенил
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,52	2,43	2,98	2,40	2,24	2,81	2,36
2	2,52	2,43	2,99	2,40	2,23	2,82	2,37
3	2,53	2,43	2,99	2,50	2,24	2,82	2,37
4	2,53	2,44	2,99	2,50	2,24	2,82	2,37
5	2,53	2,43	3,00	2,40	2,25	2,82	2,37
6	2,52	2,43	2,99	2,50	2,24	2,83	2,36
7	2,52	2,43	3,00	2,50	2,25	2,82	2,36
8	2,53	2,44	3,00	2,5	2,24	2,82	2,37
8	2,53	2,43	2,99	2,5	2,25	2,82	2,36
10	2,53	2,43	2,99	2,5	2,24	2,83	2,37

Чтобы оценить правильность проведения экспериментов введем критерий  $R$  – разрешение, который будем определять по формуле:

$$R = \frac{t_{R2} - t_{R1}}{\frac{1}{2}W1_{осн} + \frac{1}{2}W2_{осн}}, \quad (1)$$

где  $t_{R1}$  – время удерживания первого хроматографического пика;

$t_{R2}$  – время удерживания второго хроматографического пика;

$\frac{1}{2}W1_{осн}$  – полуширина первого хроматографического пика у основания;

$\frac{1}{2}W2_{осн}$  – полуширина второго хроматографического пика у основания.

Если пики являются симметричными, то:

$$\frac{1}{2}W1_{осн} + \frac{1}{2}W2_{осн} = W_{осн}, \quad (2)$$

где  $W_{осн}$  – ширина хроматографического пика у основания.

Следовательно, формула (3) будет иметь вид:

$$R = \frac{t_{R2} - t_{R1}}{W_{осн}}. \quad (3)$$

Для полностью разделившихся пиков  $R=1$ . Пример полностью разделившихся хроматографических пиков представлен на рисунке 1.

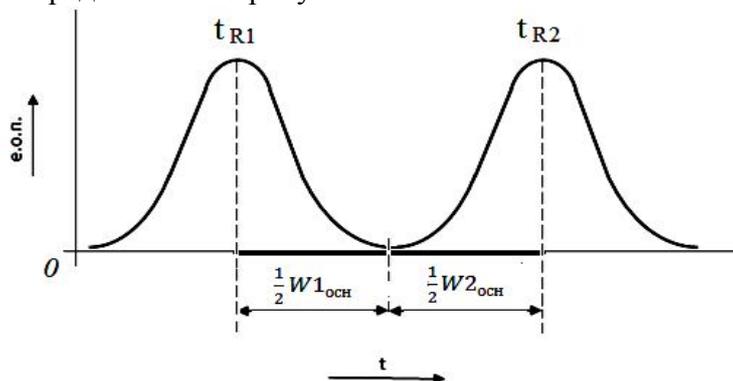


Рисунок 1 – Пример полностью разделившихся хроматографических пиков ( $R=1$ )

Исходя из рисунка 1 можно сказать, что при совпадении пиков величины ширины пиков совпадают  $W1=W2$ .

Из полученных хроматограмм следует, что времена удерживания хроматографических пиков разделены не полностью.

Пример не полного разделения пиков представлен на рисунке 2.

Чтобы оценить правильность проведения экспериментов воспользуемся описанным критерием  $R$ .

Для этого введем допущение: величина ширины пика  $W_{осн}$  в формуле (3) будет определяться не на полувысоте, а на уровне 90%. Это удовлетворяет минимальному условию соотношения сигнал шум.

Величины  $t_{R1}$  и  $t_{R2}$  будут определяться по формулам:

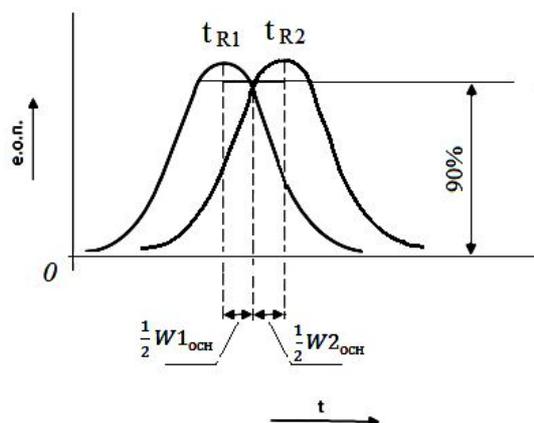


Рисунок 2 – Пример не полностью разделившихся пиков

$$t_{R1} = \bar{t}_{R1} \pm C_t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{Ri} - \bar{t}_{R1})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

$$t_{R2} = \bar{t}_{R2} \pm C_t \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^n (t_{Ri} - \bar{t}_{R2})^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

где  $\bar{t}_{R1}, \bar{t}_{R2}$  – средние значения времен удерживания для величин 1 и 2 соответственно;

$C_t$  – коэффициент Стьюдента;

$$\sqrt{\frac{\sum_1^n (t_{Ri} - \bar{t}_{R1})^2}{n(n-1)}} - \text{выражение для расчета среднеквадратичной погрешности среднего арифметического.}$$

арифметического.

Величина  $W_{осн}$  определяется экспериментально по хроматограмме.

В том случае если величина  $R$  меньше 1, то необходимо уменьшать ширину хроматографического пика, путем уменьшения диаметра используемых металлических частиц.

Используя предложенную методику и данные по временам удерживания, представленные в таблице 4, рассчитаем значение критерия  $R$ .

Для этого вычислим значение среднего значения для каждого вещества по формуле:

$$\bar{t}_R = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Ri}}{n}, \quad (6)$$

где  $t_{Ri}$  –  $i$ -е измеренное значение времени удерживания хроматографического пика;

$n$  – число измерений.

Используя формулу (6), получим:  $\bar{t}_{бензол} = 2,526$ ;  $\bar{t}_{толуол} = 2,432$ ;  $\bar{t}_{анилин} = 2,992$ ;  $\bar{t}_{хлорбензол} = 2,405$ ;  $\bar{t}_{бромбензол} = 2,242$ ;  $\bar{t}_{нитробензол} = 2,821$ ;  $\bar{t}_{бифенил} = 2,366$ .

Определим значение среднеквадратичной погрешности среднего арифметического для каждого вещества по формуле:

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{Ri} - \bar{t}_R)^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

где,  $t_{Ri}$  –  $i$ -е измеренное значение времени удерживания хроматографического пика;

$\bar{t}_{Ri}$  – среднее значение времени удерживания хроматографического пика;

$n$  – число измерений.

Используя формулу (7), получим:  $S_{бензол} = 0,0016$ ;  $S_{толуол} = 0,0013$ ;  $S_{анилин} = 0,002$ ;  $S_{хлорбензол} = 0,0017$ ;  $S_{бромбензол} = 0,002$ ;  $S_{нитробензол} = 0,0018$ ;  $S_{бифенил} = 0,0016$ .

Значение коэффициента Стьюдента определяем из стандартной таблицы и для  $P=0,95$  при числе экспериментов  $n=10$  имеет значение  $C_t = 2,22$ .

Исходя из полученных значений, запишем результаты измерений в виде интервальных оценок по формуле (5):  $\bar{t}_{бензол} = 2,526 \pm 0,0036$ ;  $\bar{t}_{толуол} = 2,432 \pm 0,0029$ ;  $\bar{t}_{анилин} = 2,992 \pm 0,0044$ ;  $\bar{t}_{хлорбензол} = 2,405 \pm 0,0037$ ;  $\bar{t}_{бромбензол} = 2,242 \pm 0,0044$ ;  $\bar{t}_{нитробензол} = 2,821 \pm 0,0039$ ;  $\bar{t}_{бифенил} = 2,366 \pm 0,0036$ .

Так как значения, входящие в формулу (4) найдены, рассчитаем значения введенного нами критерия  $R$ .

Используя хроматограмму, найдем числовое значение ширины пика  $W_{осн}$  на высоте 90 % от основания. Для хроматографической колонки, заполненной опилками чугуна, значение  $W_{осн} = 0,15$  с для пика нафталина.

Значения величин  $t_{R1}$  и  $t_{R2}$  будем выбирать следующим образом:

1. для величин  $t_{R1}$  и  $t_{R2}$  сравниваем средние значения, и вещество у которого это значение больше обозначаем  $t_{R2}$ ;

2. выберем худшее соотношение величин  $t_{R1}$  и  $t_{R2}$ , которое будет заключаться в том, что из большей величины среднего арифметического вычитается значение доверительного интервала, а к меньшему значению среднего арифметического добавляется значение доверительного интервала.

В результате использования предложенной методики были получены значения критерия  $R$  для хроматографической колонки 80x2 мм, заполненной опилками чугуна (размер частиц 50 мкм). Полученные значения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета  $R$ -критерия для хроматографической колонки 80x2 мм, заполненной опилками чугуна

Вещества-пробники	Бензол	Толуол	Анилин	Хлорбензол	Бромбензол	Нитробензол
Толуол	0,58					
Анилин	3,05	3,68				
Хлорбензол	0,76	0,22	3,86			
Бромбензол	1,84	1,22	4,94	1,03		
Нитробензол	3,08	2,55	1,08	2,72	3,80	
Бифенил	1,12	0,40	4,12	0,21	0,77	2,98

Из таблицы 2 видно, что большинство использованных веществ–пробников можно разделить по предложенной методике подготовки и проведения эксперимента, а так же предложенной математической обработке.

Проведем статистическую обработку полученных результатов для случая, когда хроматографическая колонка размерами 300x2 мм заполнена опилками алюминия (размер частиц 70 мкм).

Результаты измерения времен удерживания представлены в таблице 3.

В результате аналогичного расчета, получим таблицу 4 со значением  $R$ -критерия.

Как видно из таблицы 4, разделить вещества–пробники затруднительно. Лучше всего заметить различие возможно по сравнению с пиком бензойной кислоты.

Для возможности разделения хроматографических пиков на колонке, заполненной алюминиевыми опилками, предлагается использовать метод главных компонент и многоволновой режим детектирования [4].

Таблица 3 – Результаты эксперимента (времена удерживания хроматографической колонки 300 мм заполненной опилками алюминия)

Номер анализа, №	Бензол	Толуол	Анилин	Хлорбензол	Бромбензол	Нитробензол	Бензойная кислота
1	1,78	1,7	1,84	1,78	1,66	1,67	1,75
2	1,8	1,7	1,84	1,78	1,66	1,72	1,99
3	1,8	1,73	1,86	1,8	1,69	1,72	1,97
4	1,81	1,7	1,84	1,81	1,69	1,72	1,99
5	1,81	1,72	1,83	1,83	1,75	1,72	1,99
6	1,83	1,75	1,88	1,86	1,77	1,77	2,02
7	1,88	1,77	1,89	1,86	1,77	1,76	2,02
8	1,87	1,73	1,85	1,88	1,77	1,75	2,02
9	1,89	1,74	1,88	1,88	1,77	1,75	2,02
10	1,94	1,76	1,88	1,91	1,8	1,77	1,99

Таблица 4 – Результаты расчета *R*-критерия для хроматографической колонки 300x2 мм, заполненной опилками алюминия

Вещества пробники	Бензол	Толуол	Анилин	Хлор-бензол	Бром-бензол	Нитро-бензол
Толуол	0,26					
Анилин	0,15	0,44				
Хлорбензол	0,30	0,27	0,12			
Бромбензол	0,16	0,26	0,34	0,17		
Нитробензол	0,74	0,16	0,40	0,72	0,26	
Бензойная кислота	0,19	1,46	0,86	1,03	0,68	1,45

### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки статистической достоверности времен удерживания компонентов моторных масел, полученных методом ВЭЖХ при хорошем и плохом разрешении.

2. Выявлена необходимость использования метода главных компонент и многоволнового режима детектирования в случае неполярности поверхности.

*Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”, код проекта 10423.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев, С. Н. Критерии образования устойчивых адсорбционных слоев на полярных и неполярных поверхностях [Текст] / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, С.Г. Пузырев // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2009. – №6. – С. 103-106.
2. Сычев, С.Н. Описание эксперимента по определению адгезии компонентов моторных масел методом жидкостной хроматографии [Текст] / С.Н. Сычев, С.Г.Пузырев, К.В.Подмастерьев, Е.В.Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. – №6. – С. 130-142.
3. Сычев, С.Н. Адсорбционное модифицирование в жидкостной хроматографии на силикагеле [Текст] / С.Н.Сычев, Н.С. Аксенова, С.С. Криволапов // Ж.физ.химии – 1986. – Т.59. – № 8. – С. 1996-1998.
4. Пузырев, С.Г. Способы определения адгезии на поверхностях металлов методом ВЭЖХ [Текст] / С.Г.Пузырев, С.Н. Сычев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2011. – №5. – С. 103-106.

#### **Сычев Сергей Николаевич**

Госунiversитет УНПК, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия»  
Тел. (8486) 419892  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Пузырев Станислав Григорьевич**

Госунiversитет УНПК, г. Орел  
Аспирант  
Тел. (8486) 419892  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Чирикин Егор Владимирович**

Госунiversитет УНПК, г. Орел  
Студент  
Тел. (84862) 419876  
E-mail: PMS35@ostu.ru

## ESTIMATION OF STATISTICAL RELIABILITY OF TIMES OF KEEPING COMPONENTS OF THE ENGINE OILS RECEIVED BY METHOD OF THE LIQUID CHROMATOGRAPHY AT THE GOOD AND BAD PERMISSION

*In offered work the way of an estimation of statistical reliability of times of keeping, components of the engine oils received by a method liquid chromatography is considered. Times of keeping received on two different samples have been considered. In the first case as a filler chromatographic columns acted sawdust of a sleeve of the cylinder (pig-iron), in the second sawdust of the piston (aluminum). The given estimation is a basis for working out of a method of definition of adhesion by method liquid chromatography.*

**Keywords:** adhesion, chromatographic columns.

### BIBLIOGRAPHY

1. Sychev, S. N. Kriterii obrazovaniya ustojchivyh adsorbcionnyh sloev na poljarnyh i nepoljarnyh poverhnostjakh [Tekst] / S.N. Sychev, V.A. Gavrilina, K.V. Podmaster'ev, E.V. Paholkin, S.G. Puzyrev // Izvestija OrjolGTU. – Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2009. – №6. – S. 103-106.
2. Sychev, S.N. Opisaniye jeksperimenta po opredeleniju adgezii komponentov motornyh masel metodom zhidkostnoj hromatografii [Tekst] / S.N. Sychev, S.G. Puzyrev, K.V. Podmaster'ev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – №6. – S. 130-142.
3. Sychev, S.N. Adsorbcionnoe modifitsirovanie v zhidkostnoj hromatografii na silikagele [Tekst] / S.N. Sychev, N.S. Aksenova, S.S. Krivolapov // Zh.fiz.himii – 1986. T.59. № 8. S. 1996-1998.
4. Puzyrev, S.G. Sposoby opredeleniya adgezii na poverhnostjakh metallov metodom VJeZhH [Tekst] / S.G. Puzyrev, S.N. Sychev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2011. – №5. S. 103-106.

#### **Sychev Sergey Nikolaevich**

State university USIC, Orel  
Dr.Sci.Tech., the professor of chair "Chemistry"  
Ph. (8486) 419892  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Puzyrev Stanislav Grigorevich**

State university USIC, Orel  
The post-graduate student  
Ph. (8486) 419892  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Chirikin Egor Vladimirovich**

State university USIC, Orel  
Student  
Ph. (84862) 419876  
E-mail: PMS35@ostu.ru

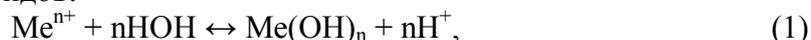
С.А. КУЦЕНКО, А.Ю. ВИНОКУРОВ

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОАГУЛЯНТОВ ПРИ  
ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

*Разработан метод определения расходов и условий применения коагулянтов для очистки сточных вод промышленных предприятий. Проведена сравнительная оценка эффективности осветления воды при использовании хлорного железа и алюмосодержащего коагулянта Аква-Аурат 30.*

**Ключевые слова:** сточные воды, очистка, коагуляция, метод контроля, эффективность.

К наиболее распространенным методам физико-химической очистки сточных вод промышленных предприятий относится коагулирование. Оно заключается в снижении устойчивости взвеси нерастворимых примесей в очищаемой воде в результате введения солей поливалентных металлов. Соли металлов подвергаются гидролизу с образованием соответствующих малорастворимых гидроксидов:



которые становятся центрами образования хлопьев взвешенных в очищаемой воде частиц в результате их слипания. Помимо эффекта осветления, достигающего 90-95 %, применение коагулянтов обеспечивает снижение ХПК на 72 %, содержания фосфора – на 97,5 %, бактерий – на 40-80 % за счет их сорбции на поверхности частиц осадка [1].

На сегодняшний день известно большое количество коагулянтов, используемых в процессах водоочистки в условиях реальных производств: сульфаты алюминия и железа (II), хлорид железа (III), основные соли алюминия и т.д. Общепринято проводить сравнение их технологических свойств по уровню расхода на 1 м<sup>3</sup> очищаемой воды. Однако, эффективность применения указанных соединений, и, следовательно, требуемый расход, определяются огромным набором факторов: свойствами очищаемой воды, чувствительностью к условиям работы (рН, температура) и особенностями аппаратурно-технологической схемы очистных сооружений. Поэтому в процессе разработки и внедрения технологии очистки сточных вод большое внимание уделяют методикам оценки свойств используемых коагулянтов. В ГОСТ Р 51642-2000 [2] изложен стандартный метод сравнительного определения эффективности коагулянтов на модельных суспензиях мутности, суть которого заключается во введении при быстром перемешивании раствора коагулянта в водную суспензию каолина, выдерживании полученной смеси сначала при медленном перемешивании, а затем в спокойном состоянии и последующем определении показателей качества очищенной воды (мутность, цветность, остаточное содержание железа или алюминия, водородный показатель). Важным условием объективности получаемых по данной методике результатов является четкое соблюдение условий ее проведения (температуры, длительности и интенсивности быстрого и медленного перемешивания). По результатам опытов строят графики зависимости оцениваемого показателя качества воды от расхода испытываемых соединений.

По нашему мнению, данная методика не может обеспечить объективный выбор коагулянта для применения в условиях конкретного предприятия. Это связано с неучтенностью целого ряда особенностей осуществления процесса коагуляции в промышленных условиях.

Во-первых, различия химических свойств используемых в качестве коагулянтов соединений делает чисто формальным осуществление абсолютно идентичных операций при оценке их эффективности. Так, в соответствии с уравнением (1) при гидролизе солей железа и алюминия образуются протоны водорода, смещающие равновесие влево. Однако степень влияния этого эффекта определяется стехиометрическим составом коагулянта: на один катион железа (III) или алюминия в их средних солях образуется по три протона водорода, на один катион алюминия в его гидроксихлориде (Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl) – всего 1/2, а в коагулянте несте-

хиометрического состава  $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$  (торговое название Аква-Аурат 30) – 1,7. Поэтому применение подщелачивающих веществ, связывающих протоны водорода, при использовании  $Al_2(OH)_5Cl$  не является необходимым, а в случае применения остальных – целесообразно. Особенно влияние кислотно-основного равновесия может быть определяющим при использовании в качестве коагулянтов средних солей.

Во-вторых, модельная суспензия мутности не может отражать особенностей химического состава воды и гранулометрического состава содержащихся в ней взвешенных веществ. Так, повышенное значение ХПК, связанное со значительным содержанием в воде органических соединений, а также высокая степень дисперсности взвесей требуют увеличения дозы коагулянта [3]. С другой стороны, присутствующие в очищаемых промышленных стоках гидрокарбонаты связывают образующиеся при гидролизе протоны водорода и снижают потребность в дополнительном подщелачивании.

В-третьих, прямая зависимость эффективности применения коагулянта от реализуемой аппаратурно-технологической схемы обуславливает необходимость моделирования протекающих в реальных условиях процессов. Методика, приведенная в стандарте, опирается на общие представления об основных стадиях процесса коагуляционной очистки воды: быстрое эффективное смешивание очищаемой воды с рабочими растворами коагулянтов, медленное перемешивание полученной смеси, способствующее образованию крупных хлопьев осадка, и, наконец, спокойное отстаивание. На практике эти операции последовательно проводят в аппаратах различной конструкции: смесителях, хлопьеобразователях и отстойниках. Естественно, что степень очистки воды будет определяться особенностями их конструктивного исполнения. Конфигурация применяемых аппаратов должна обеспечивать оптимальное время пребывания в нем воды, а также наиболее приемлемый характер ее движения. Последнее особенно важно при эксплуатации хлопьеобразователей. Так, высокая скорость и турбулентный характер потока обработанной коагулянтами воды не только не будет способствовать укрупнению частиц взвесей, но и приведет к их разрушению и стабилизации суспензии.

Таким образом, метод контроля эффективности коагулянтов для очистки сточных вод в промышленных условиях должен основываться на лабораторных исследованиях, максимально приближенных к реальным. Поэтому необходимость учета свойств конкретных сточных вод делает обязательным их использование в качестве модельных суспензий. Поскольку химический и фазовый состав очищаемых стоков может значительно изменяться в зависимости от многих факторов для получения представительных результатов оценки эффективности использования коагулянтов отбор проб следует проводить периодически. Осуществление экспериментов с образцами, отличающимися как по количественным, так и качественным показателям, позволяет определить интервал концентраций коагулянтов, обеспечивающий постоянство степени очистки, что является обязательным условием стабильно работающих очистных сооружений.

Медленное перемешивание сточной воды с раствором коагулянта не является удовлетворительным подходом к моделированию процесса хлопьеобразования в лабораторных условиях. Несмотря на то, что в технологической схеме очистных сооружений может быть предусмотрен аппарат, снабженный перемешивающим устройством, на практике такое конструктивное решение редко находит применение. Наиболее часто задача укрупнения хлопьев взвесей решается путем организации сложного характера движения очищаемой воды [1, 3]. Одним из доступных и адекватных способов воспроизведения гидродинамических условий хлопьеобразования может быть создание лабораторной модели реального аппарата.

В соответствии со стандартом, метод контроля эффективности коагулянтов должен проводиться на основании определения одного из регламентируемых показателей качества воды. Однако проведение необходимых лабораторных анализов может занимать достаточно значительное время (сутки и более), что в случае необходимого большого числа проб значительно увеличивает трудоемкость всей работы. Очевидно, в случае поиска наиболее подходящего коагулянта или его оптимальной дозы при очистке сточных вод конкретного производства в качестве критерия оценки может быть выбран любой показатель, значение которо-

го изменяется в зависимости от степени загрязненности воды. В качестве такого показателя, на наш взгляд, можно использовать величину светопропускания очищенной воды, определяемую отношением интенсивностей потоков света, прошедшего через пробу и направленного на нее. Измерение светопропускания занимает всего несколько минут и требует наличия обычного лабораторного фотоколориметра.

Описанные выше подходы к решению задачи определения оптимального расхода коагулянтов были использованы авторами статьи при разработке технологии очистки ливневых сточных вод крупного орловского предприятия.

На первом этапе был проведен сравнительный анализ эффективности очистки воды при использовании коагулянтов – хлорного железа ( $FeCl_3$ ) и Аква-Аурата 30. Нами были изучены зависимости качества очищенной воды от порядка подачи и расхода реагентов, а также длительности быстрого и медленного перемешивания. Показано, что эффективность использования каждого из двух коагулянтов может быть повышена при дополнительном подщелачивании воды раствором кальцинированной соды в среднем на 6-10 %.

Порядок введения коагулянта и подщелачивающего реагента оказывает принципиальное влияние лишь в случае Аква-Аурата 30 (таблица 1), что следовало бы учитывать при реализации схемы очистки с использованием данного реагента.

Таблица 1 – Светопропускание ( $T$ , %) воды при применении разных схем очистки от взвешенных веществ

№ схемы	Порядок подачи реагентов	$T$ , %
1	Аква-Аурат 30 + $Na_2CO_3$	42,0
	$Na_2CO_3$ + Аква-Аурат 30	87,1
	совместное введение	82,9
2	$FeCl_3$ + $Na_2CO_3$	92,3
	$Na_2CO_3$ + $FeCl_3$	89,4
	совместное введение	93,3

Выбор способа и условий смешения очищаемой воды с реагентами не оказывает принципиального влияния на результат очистки в целом. В то же время эксперименты показали, что длительность медленного перемешивания, способствующего хлопьеобразованию, может оказывать решающее влияние на результат очистки (рис. 1).

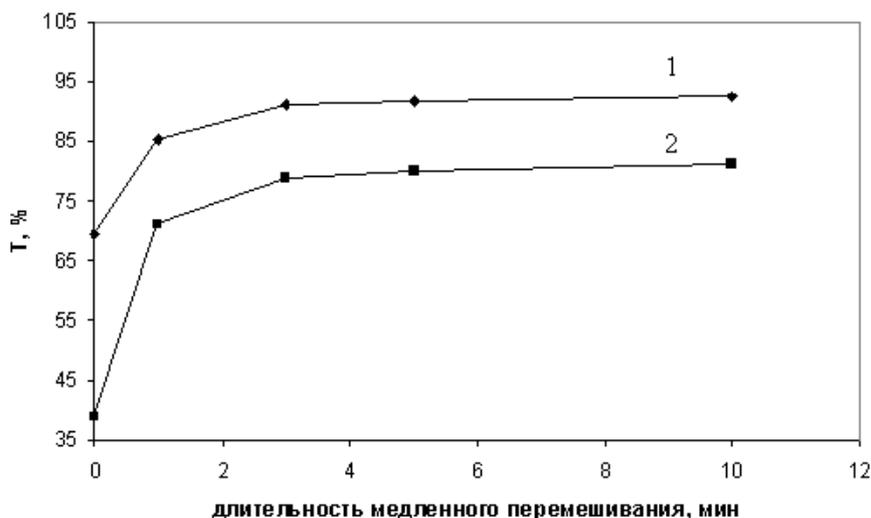


Рисунок 1 – Зависимость светопропускания очищенной воды от длительности медленного перемешивания при использовании  $FeCl_3$  (1) и Аква-Аурата 30 (2)

Рисунок 1 показывает, что гидродинамические условия и длительность хлопьеобразования существенно влияют на очистку воды при использовании, как хлорного железа, так и

Аква-Аурата 30. Но во втором случае это влияние имеет более выраженный характер, особенно в интервале от 0 до 3 минут.

При реализации найденных оптимальных условий применения коагулянтов получены зависимости светопропускания очищенной воды от расхода  $FeCl_3$  и Аква-Аурата 30 (в пересчете на соответствующий полуторный оксид) (рис. 2 и 3).

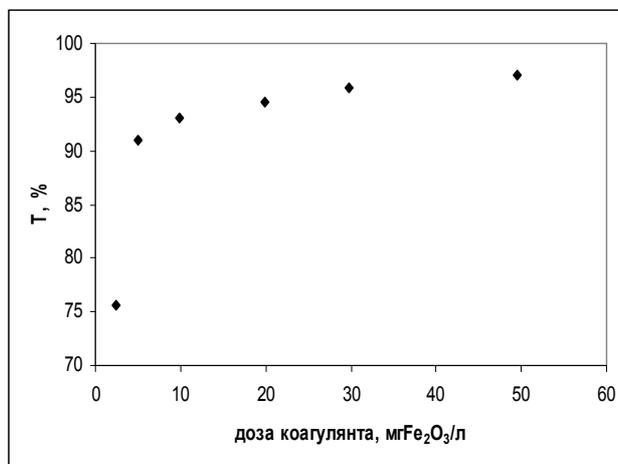


Рисунок 2 – Зависимость светопропускания очищенной воды от расхода  $FeCl_3$  (в пересчете на  $Fe_2O_3$ ) после отстаивания в течение 1 часа

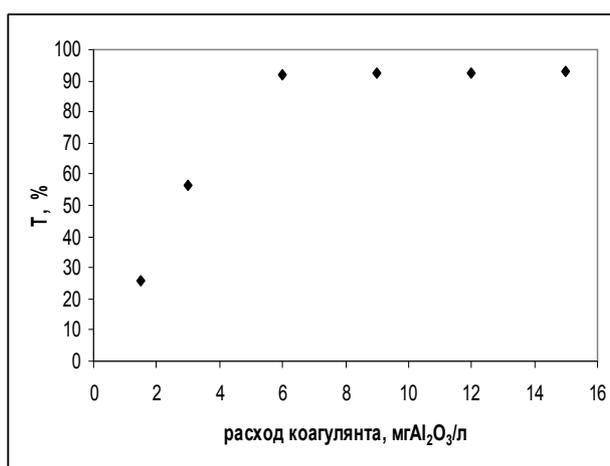


Рисунок 3 – Зависимость светопропускания очищенной воды от расхода Аква-Аурата 30 (в пересчете на  $Al_2O_3$ ) после отстаивания в течение 1 часа

Результаты указанных лабораторных исследований свидетельствуют о том, что оба коагулянта позволяют достичь одинаковой степени очистки воды (светопропускание 92-95 %) при сравнительно равных расходах (5-6 мг  $Me_2O_3$  на 1 л воды). Дальнейшее увеличение дозы коагулянтов практически не оказывает влияние на удаление взвешенных веществ. Таким образом, предложенным методом определен достаточно широкий интервал концентраций реагентов, обеспечивающий стабильно высокие показатели очистки.

Визуальная оценка процесса отстаивания растворов показала, что осаждение с хлорным железом протекает быстрее. Это связано с большей плотностью хлопьев гидроксида железа ( $3,6 \text{ г/см}^3$ ) по сравнению с хлопьями гидроксида алюминия ( $2,4 \text{ г/см}^3$ ) [4]. Помимо этого, применение солей алюминия осложняется возможностью растворения  $Al(OH)_3$  при достаточно невысоких значениях рН вследствие амфотерного характера его химических свойств.

Таким образом, по совокупности проанализированных показателей признано целесообразным использование хлорного железа при промышленной очистке ливневых сточных

вод, максимальная эффективность которого реализуется в интервале концентраций 6-10 мг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/л.

Для оценки суммарного результата реализации полученных параметров осветления воды в производственных условиях были изготовлены две лабораторные установки, позволяющие моделировать возможные схемы хлопьеобразования. Первая представляет собой горизонтальную камеру, разделенную перегородками на ряд последовательно проходимых очищаемой водой коридоров. Проведенные эксперименты показали, что получаемый в данном случае сложный характер движения воды способен в достаточной степени обеспечить образование крупных частиц взвешенных веществ. Однако в процессе работы может происходить заиливание аппарата вследствие частичного оседания хлопьев (особенно при периодической или неравномерной подаче воды на очистку). Это увеличивает трудоемкость эксплуатации очистных сооружений. Вторая схема имитирует вертикальную цилиндрическую камеру, в которую вода подается по касательной к стенке и проходит сверху вниз. Такой аппарат должен устанавливаться непосредственно в отстойнике. Это обеспечит в процессе последующего осветления прохождение очищаемой воды снизу вверх через слой ранее выделившегося осадка, удерживающего мелкие хлопья взвесей. Полученные при исследовании второй схемы хлопьеобразования экспериментальные данные (светопропускание очищенной воды – 90-92 %) свидетельствует о высокой эффективности предложенной технологии очистки при ее внедрении в реальных промышленных условиях.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Яковлев, С.В. Канализация: учебник для ВУЗов [Текст] / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – 5-е изд. – М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.
2. ГОСТ Р 51642-2000. Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования и метод определения эффективности. – Введ. 2001-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 9 с.
3. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение: учебник для ВУЗов [Текст] / Н.Н. Абрамов. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
4. Куценко, С.А. Комплексная переработка солевых алюмосодержащих шлаков [Текст] / С.А. Куценко, Л.Н. Курдюмова, Н.В. Кубаткина. – Орел: ОрелГТУ, 2007. – 171 с.

**Куценко Станислав Алексеевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел: (4862) 41 98 92

E-mail: chemistry@ostu.ru

**Винокуров Андрей Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Аспирант кафедры «Химия»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел: (4862) 41 98 92

E-mail: chemistry@ostu.ru

---

S.A. KUTSENKO, A.Yu. VINOKUROV

### **THE METHOD OF CONTROL OF COAGULANTS EFFICIENCY IN INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT**

*The method for determining of the consumption and conditions of coagulants usage for industries wastewater treatment was developed. The efficiency of water clarification by using ferric chloride and aluminum-coagulant Aqua-Aurat 30 was evaluated.*

**Keywords:** wastewater, treatment, coagulation, method of control, efficiency.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Jakovlev, S.V. Kanalizacija: uchebnik dlja VUZov [Tekst] / S.V. Jakovlev, Ja.A. Karelin, A.I. Zhukov, S.K. Kolobanov. – 5-e izd. – M.: Strojizdat, 1975. – 632 s.
2. GOST R 51642-2000. Koagulyanty dlja hozjajstvenno-pit'evogo vodosnabzhenija. Obwie trebovanija i metod opredelenija jeffektivnosti. – Vved. 2001-07-01. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000. – 9 s.
3. Abramov, N.N. Vodosnabzhenie: uchebnik dlja VUZov [Tekst] / N.N. Abramov. – 2-e izd. – M.: Strojizdat, 1974. – 480 s.
4. Kucenko, S.A. Kompleksnaja pererabotka solevyh aljumosoderzhawih shlakov [Tekst] / S.A. Kucenko, L.N. Kurdjumova, N.V. Kubatkina. – Orel: OrelGTU, 2007. – 171 s.

**Kutsenko Stanislav Alekseevich**

State University-Education-Science-Production Complex  
Doctor of technical science, professor, head of the department «Chemistry»  
302020, Orel, Naugorskoye Chaussee, 29  
Phone (4862) 41 98 92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

**Vinokurov Andrew Yurievich**

State University-Education-Science-Production Complex  
Post-graduate student at the department «Chemistry»  
302020, Orel, Naugorskoye Chaussee, 29  
Phone (4862) 41 98 92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей.**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

*Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unprk.ru](http://www.gu-unprk.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

*Адрес учредителя*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 42-00-24  
Факс (4862) 41-66-84  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Технический редактор Григорьева О.Ю.  
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 06.09.2011 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.

---