

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.

Редколлегия

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.
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, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
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, 2013

Содержание

Естественные науки

Корнеев Ю.С., Гордон В.А., Корнеева Е.Н. Исследование динамики машинного агрегата с пускозащитной муфтой.....	3
Волынчиков С.Ю., Манжосов В.К. Движение системы «упругий стержень – жесткое тело» и ее состояние при разрыве связи.....	9
Шадрин И.Ф. Жесткие стержни и круги на двумерной поверхности. Агрегаты (Кластеры).....	18

Моделирование технологических процессов

Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Математическая модель напряженного состояния растительного материала в цилиндрических фильерах матрицы пресс-гранулятора.....	25
Кошин А.А., Дьяконов А.А. Имитационные алгоритмические модели в технологии машиностроения..	35

Конструирование, расчеты, материалы

Бабкин В.И., Алексахин А.А., Яновский Л.С., Дунаев С.В., Хурумова А.Ф. Перспективы развития авиационных ГТД как фактор эволюции авиационных смазочных масел.....	41
Елисеев А.Д., Шаталов В.А. Повышающий конвертор напряжения электрического стабилизатора вращающейся платформы.....	50
Мандель А.М., Лоскутов А.И., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И. О возможности определения локальной фрактальной размерности поверхности по вольтамперным характеристикам туннельного тока.....	56
Лашко В.А., Тимошенко Д.В. Расчетное исследование переходных режимов четырехтактного дизеля с газотурбинным наддувом.....	61
Гусев В.Г., Симаков А.Г. Исследование стружки, полученной в процессе испытания торцовых фрез...	72

Машиностроительные технологии и инструменты

Кадырметов А.М., Сухочев Г.А. Совершенствование процессов и проблемные вопросы плазменного нанесения и упрочнения покрытий на основе модуляции электрических параметров.....	78
Киричек А.В., Баринев С.В., Соловьев Д.Л., Латаев А.П. Конечно-элементное моделирование создания и испытаний гетерогенно упрочненного поверхностного слоя.....	87
Усов С.В., Свириденко Д.С., Гончаров Е.В., Коленцев С.Н. Конструктивно-технологические возможности гидроабразивной обработки деталей машин как фактора научно – технического прогресса.....	95

Инновации и кадры в машиностроении

Морозова А.В. Процедура шкалирования оси линейной модели оценки уровня сформированности компетенции специалиста технического профиля.....	100
---	-----

Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

Родичева М.В., Абрамов А.В., Павловская А.А. Процессы переноса влаги в капиллярно-пористых коллоидных полотнох. Часть 1. Гигроскопическое состояние.....	106
--	-----

Приборостроение и биотехнические системы

Солдаткина Е.С., Солдаткин В.М. Анализ метрологических характеристик вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.....	111
Незванов А.И., Есилов В.Н. Статистические характеристики гидроакустических маятниковых датчиков контроля уровня железнодорожного пути с амплитудным методом съема информации.....	118
Никитин А.В. Алгоритмы и погрешности бортовой системы измерения параметров ветра и вектора воздушной скорости вертолета на стартовых и взлетно-посадочных режимах.....	124

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

Пахолкин Е.В., Кобзев И.О. Математическая модель максимальной температуры в подшипнике качения для квазистационарного повторно-кратковременного режима трения.....	135
Марков В.В., Огудинников А.Н., Подмастерьев К.В. Проблема оценки эффективности процессов жизненного цикла продукции в системе менеджмента качества.....	144
Кулаков А.Ф., Полухин Т.С. Виды аудита и способы его организации в системе менеджмента качества на примере Госуниверситета - УНПК.....	151
Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Куц В.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования.....	159



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

№ 2 (298) 2013

March-April

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
Kopylov Y.R. 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) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

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

Index on the catalogue of the «Pressa
Rossii» 29504

© State University – ESPC, 2013

Contents

Natural science

Korneyev Y.U.S., Gordon V.A., Korneyeva E.N. Research of dynamics of the machine unit with the push-rod coupling.....	3
Volynchikov S.Yu., Manzhosov V.K. The movement of the system «elastic rod-rigid body» and its condition at rupture of the contacts.....	9
Shadrin I.F. Hard sticks and circles in the two-dimensional surface. Units (Clusters).....	18

Process modeling

Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Mathematical model of stress system of plant raw materials in cylindrical extrusion nozzles of pellet mill die.....	25
Koshin A.A., Dyakonov A.A. Imitating algorithmic models in technology of mechanical engineering.....	35

Construction, calculation, material

Babkin V.I., Aleksashin A.A., Janovsky L.S., Dunaev S.V., Hurumova A.F. Evolution of aviation lubricants oils as a result of the development of gas turbine engines.....	41
Eliseev A.D., Shatalov V.A. Electrically stabilized rotating platform step-up converter.....	50
Mandel A.M., Loskutov A.I., Oshurko V.B., Solomakho G.I. To the possibility of determination of the surface local fractal dimension by current-voltage characteristics of the tunneling current.....	56
Lashko V.A., Timoshenko D.V. The numerical research of transition performance four-stroke supercharging diesel engine.....	61
Gusev V.G., Simakov A.G. Research of the shaving received in the course of test of face mills.....	72

Machine building technology and toolware

Kadyrmetov A.M., Suhochev G.A. The improvements and problem questions of the processes of plasma coatings and hardening of coatings based on the electrical parameters modulation.....	78
Kirichek A.V., Barinov S.V., Solov'yev D.L., Lataev A.P. Finite-element modeling and testing of the heterogeneous hardened surface layer.....	87
Usov S.V., Sviridenko D.S., Goncharov E.V., Kodentsev S.N. Structural and technological waterjet possibility of processing machine parts as a factor scientific – technical progress.....	95

Innovation and frame in machine building

Morozova A.V. Procedure of development of the scale for the axis of linear model of the estimation of the level of the competence of the expert of the technical structure.....	100
---	-----

Machine, apparatus, technology light and food industry

Rodicheva M.V., Abramov A.V., Pavlovskaya A.A. Processes of transfer of moisture in capillary and porous colloidal cloths. Part I. Hygroscopic condition.....	106
---	-----

Instrument making and biotechnological system

Soldatkina E.S., Soldatkin V.M. Analysis of metrological characteristics of the vortex sensor of the aerodynamic corner and true air speed.....	111
Neznanov A.I., Esipov V.N. The static response of pendular hydroacoustic sensor with amplitude method of receiving information for the disparity in levels of rails measurement.....	118
Nikitin A.V. Algorithms and errors of onboard system of measurement of parameters of the wind and the vector of air speed of the helicopter on starting and takeoff and landing modes.....	124

Tests, control, diagnostics and quality control

Pakholkina E.V., Kobzev I.O. Mathematical model of the maximum temperature in the rolling bearing for the quasistationary repeated and short-term mode of friction.....	135
Markov V.V., Otrubnyannikov A.N., Podmasteryev K.V. Problem of appraisal a efficiency the processes of living cycle of production in the system of quality management.....	144
Kulakov A.F., Polukhin T.S. Overview of auditing and ways of its organization in the quality management system on the example of the State University - ESPC.....	151
Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. The forecasting of a parametric reliability of an precision process equipment.....	159

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 62 – 231.322.2

Ю.С. КОРНЕЕВ, В.А. ГОРДОН, Е.Н. КОРНЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАШИННОГО АГРЕГАТА
С ПУСКОЗАЩИТНОЙ МУФТОЙ**

Рассматриваются вопросы динамического анализа машинного агрегата с приводом от асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Момент сопротивления рабочей машины – величина постоянная. В результате аналитического и экспериментального исследований определено время включения муфты и найдены зависимости угловых скоростей и ускорений, а также моментов, нагружающих муфту и двигатель от времени.

Ключевые слова: *машинный агрегат, пускозащитная муфта, асинхронный электродвигатель, момент, технологическая машина.*

Большинство технологических машин в настоящее время приводится от двигателей, не допускающих больших перегрузок: синхронных короткозамкнутых электродвигателей или двигателей внутреннего сгорания. Это объясняется присущей таким двигателям высокой надежностью в эксплуатации и предельной простотой устройства и управления. Использование различных типов муфт скольжения позволяет предохранять эти двигатели от перегрузок при различных условиях работы. Короткозамкнутый асинхронный двигатель, вал которого соединен с валом рабочей машины с помощью глухой или упругой муфты (наиболее часто используемые), в течение почти всего разгона работает на реактивной ветви характеристики и при большом моменте инерции или отключается в результате тепловой защиты, или может выйти из строя [1]. К тому же в начальный момент рабочая машина начинает двигаться рывком, с большими перегрузками, превышающими номинальный вращающий момент двигателя в 2 – 2,5 раза [2]. Это недопустимо для некоторых типов текстильных машин, конвейеров, транспортеров, формовочных, завалочных машин и т.п. Применение более мощных двигателей также не может дать нужного эффекта. Конечно, можно применить электродвигатели с фазными кольцами, вводя в их цепи активные и реактивные сопротивления, жидкостные реостаты и т.п. Но такие приводы сложны и дороги, поэтому, в основном, применяются в достаточно мощных машинах. Пусковые фрикционные муфты позволяют электродвигателю после пуска быстро выйти на активную ветвь характеристики и обеспечить плавный разгон машины. Поэтому пусковые муфты широко применяются в системах с большими моментами инерции, а также в системах, которые пускают под нагрузкой и когда недопустимы большие ускорения и динамические перегрузки. Кроме того, пусковые муфты позволяют и при установившемся движении в случае перегрузок работать асинхронному двигателю на активной ветви характеристики, а перегрузки в этом случае не вызывают повреждения каких либо элементов привода.

Есть много удачных конструкций пусковых муфт, нашедших широкое применение в машиностроении [3]. К этому же классу относится и пускозащитная муфта [4 – 6], нашедшая применение в приводах конвейеров и машин литейного производства благодаря простоте устройства, удобству обслуживания, малой стоимости и достаточной надежности. Ранее [5, 6] рассмотрены конструкции этой муфты и профилирование нажимного диска из условия наименьших ускорений, возникающих при разгоне рабочей машины, определены основные параметры.

Ниже дан расчет переходного процесса пуска машинного агрегата с пускозащитной муфтой. На основании анализа пуска машинного агрегата представляется возможность определить время включения муфты и сравнить его с оптимальным, а также получить зависи-

мость угловой скорости рабочей машины в функции времени, на основании которой можно судить об ускорениях, возникающих в системе, и о плавности пуска.

При исследовании движения машинного агрегата электромагнитные переходные процессы описываются сложной системой дифференциальных уравнений [7]. Применять эти уравнения для большинства случаев нецелесообразно. В работе [8] рассмотрены различные варианты применения уравнений движения приводов с асинхронными электродвигателями. На основании этого исследования, а также работы [9] можно сделать вывод, что при исследовании динамики машин с асинхронными электродвигателями в случаях, когда не требуется изучение колебаний угловой скорости с частотой высших порядков, можно применить уравнение в виде:

$$\frac{dT_d}{dt} + \frac{T_d}{T} + \frac{\phi_1}{v\omega_0} = \frac{1}{vT}; \quad (1)$$

$$I_1\ddot{\phi}_1 = T_d - T_\phi, \quad (2)$$

где $\phi_1, \ddot{\phi}_1$ – угол поворота и угловая скорость электродвигателя;

T – электромагнитная постоянная двигателя;

T_d – вращающий момент двигателя;

v – коэффициент крутизны статической характеристики;

ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода;

T_ϕ – момент трения в фрикционном узле муфты;

I_1 – приведенный момент инерции ротора электродвигателя и ведущей полумуфты.

Применение характеристик в форме (1) и (2) хорошо зарекомендовало себя при исследовании установившегося движения. В ряде случаев такая характеристика применялась и для неустановившегося движения [10]. Однако в последнем случае желательна экспериментальная проверка полученных результатов. В нашем случае результаты теоретического анализа проверяются экспериментально, поэтому будем использовать характеристику в форме (1) и (2). Для решения (1) и (2) к ним необходимо добавить уравнения движения регулирующих грузов муфты в форме

$$m_{\text{ш}} \frac{dv_0}{dt} + f m_{\text{ш}} \frac{v_0^2}{\rho} + (F_{\text{min}} + c_1 y) (2f \sin \beta) + \cos \beta - \\ - 0,25 m_{\text{ш}} x \omega_1^2 (\sin \beta - f \cos \beta), \quad (3)$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса шара;

V_0 – скорость центра тяжести шара;

ρ – радиус кривизны в данной точке практической кривой рабочего профиля диска 5 [6];

x, y – координаты практической кривой регулирующего диска 5;

f – коэффициент трения;

c_1 – жесткость пружины;

F_{min} – наименьшая сила сжатия пружины;

β – угол между нормалью в точке контакта шара с диском 5 и вертикалью [5].

Момент сопротивления в фрикционном узле:

$$T_\phi = \mu n R_{\text{ср}} N + f_y r_{\text{п}} N + f_p G r_{\text{ш}} \quad (4)$$

где n – число поверхностей трения;

μ – коэффициент трения фрикционных поверхностей;

$R_{\text{ср}}$ – средний диаметр поверхностей трения; N – осевая нагрузка на фрикционный узел, определяемая из условия равновесия регулирующих шаров 4 [5];

f_y – коэффициент трения в подшипнике качения;

$r_{\text{п}}$ – радиус посадочной поверхности подшипника;

G – вес упорного диска 5;

f_p – коэффициент трения диска 5 при скольжении по полумуфте 3 [5].

Приведенный момент инерции:

$$I_1 = I_{\pi} + 0,25z(m_{\pi} + I_{\pi}r^{-2})x^2, \quad (5)$$

где I_{π} – постоянная составляющая;

I_{π} – момент инерции шара;

z – число шаров;

r – радиус шара.

Уравнения (1) – (3) определяют движение системы до тех пор, пока ведомая полумуфта не стронется с места. После этого для описания движения системы к уравнениям (1) – (3) следует добавить уравнение:

$$I_2 \frac{d\omega_2}{dt} = T_{\phi} - T_c, \quad (6)$$

где I_2 – момент инерции рабочей машины (вместе с ведомой полумуфтой);

T_c – момент сопротивления, который для обширного класса машин является величиной постоянной.

Система дифференциальных уравнений (1) – (3) и (6) решалась численным методом Рунге-Кутты. Начальные условия:

$$t = 0, T_{до} = T_0, \omega_{10} = 0, \omega_{20} = 0, V_{00} = 0, x_0 = R_0, y(R_0) = 0,$$

где T_0 – начальный пусковой момент при угловой скорости ротора, равной нулю;

R_0 – радиус, определяющий нижнее положение шара.

Решение дифференциальных уравнений осуществлялось на ЭЦВМ «Наири-2». Результаты расчета пускозащитной муфты представлены на рисунке 1.

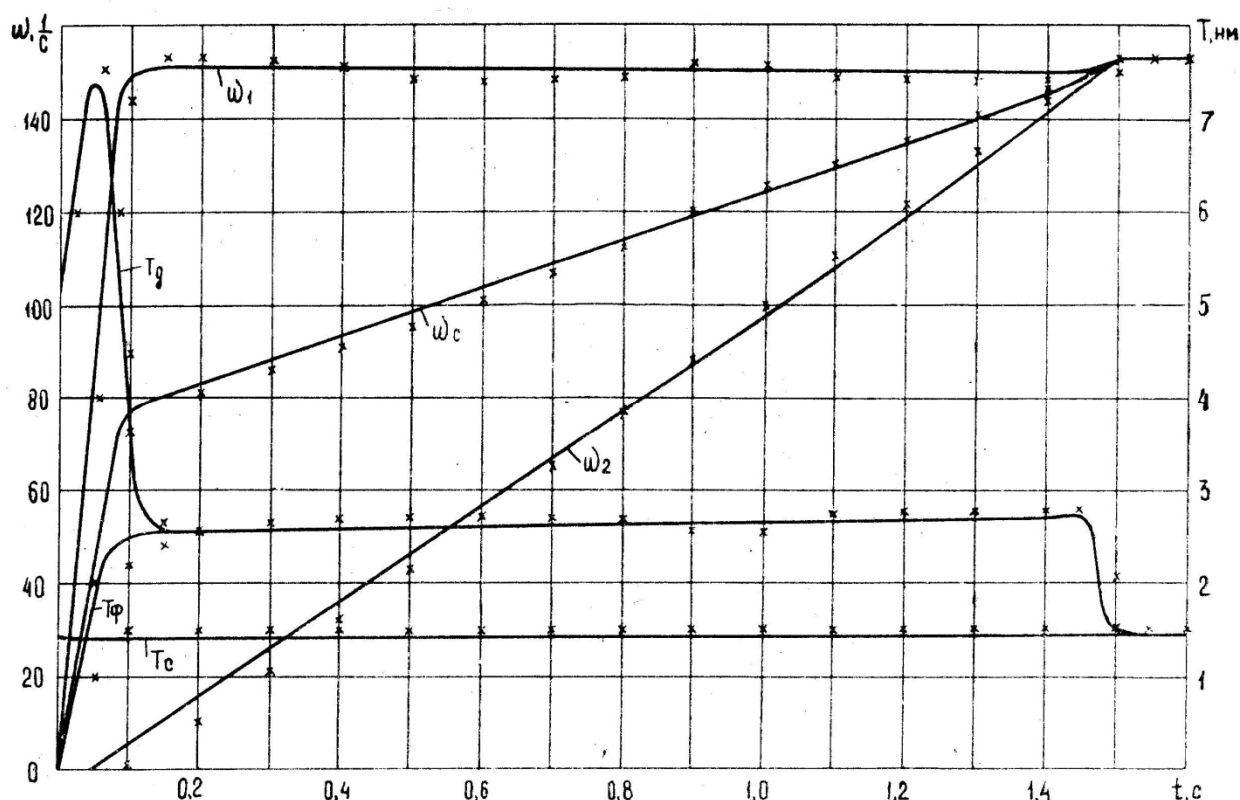


Рисунок 1 – Результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики машинного агрегата с пускозащитной муфтой

Была проведена экспериментальная проверка результатов теоретического исследования на специальном стенде. Стенд (рис. 2) состоит из электродвигателя 1 типа А-31-4, статор которого установлен на шарикоподшипниковых опорах 2, исследуемой муфты 3, контрпри-

вода 4, дискового тормоза 5, центробежного тормоза 6, маховика 7 и ртутного токосъемника 8. Контрпривод 4 представляет собой промежуточный привод, состоящий из дополнительного вала, подшипников качения и стойки с основанием. Через этот контрпривод передается движение исполнительному механизму (нагрузочному устройству) от электродвигателя, он предназначен также для быстрого и точного соединения и разъединения вала электродвигателя и вала нагрузочного устройства. Дисковый тормоз 5 используется для создания нагрузки на исполнительном механизме, близкой к постоянной величине, а центробежный тормоз 6 создает нагрузку, которая является функцией угловой скорости ведомого вала. Сочетание дискового и центробежного тормозов делает испытательный стенд универсальным устройством, так как позволяет изменять нагрузку в процессе испытания и тем самым имитировать вид рабочей машины. Для измерения момента сил, развиваемого электродвигателем, его статор с помощью двусторонней призмы опирается на измерительную балку с двумя наклеенными проволочными датчиками сопротивлений, которые через электроизмерительный мост усилителя подключались к одному из шлейфов осциллографа. Момент сил, передаваемый муфтой ведомому валу, измерялся с помощью двусторонней балки, установленной между контрприводом 4 и валом дискового тормоза 5. На измерительной балке наклеены четыре проволочных датчика сопротивлений, выводы от которых через ртутный токосъемник 8 присоединяются к измерительному мосту усилителя. Запись угловых перемещений ведущего и ведомого валов, а также сепаратора осуществлялась датчиком импульсного типа, который состоит из постоянного магнита с обмоткой и стального зубчатого диска. Дисковый тормоз состоит из диска 5, закрепленного на вращающемся валу, колодок, сжимаемых пружиной и опирающихся на стойку с измерительной балкой, на которую наклеены проволочные датчики сопротивлений для измерения момента сопротивления со стороны рабочей машины. Тормозной момент измерялся с помощью осциллографа.

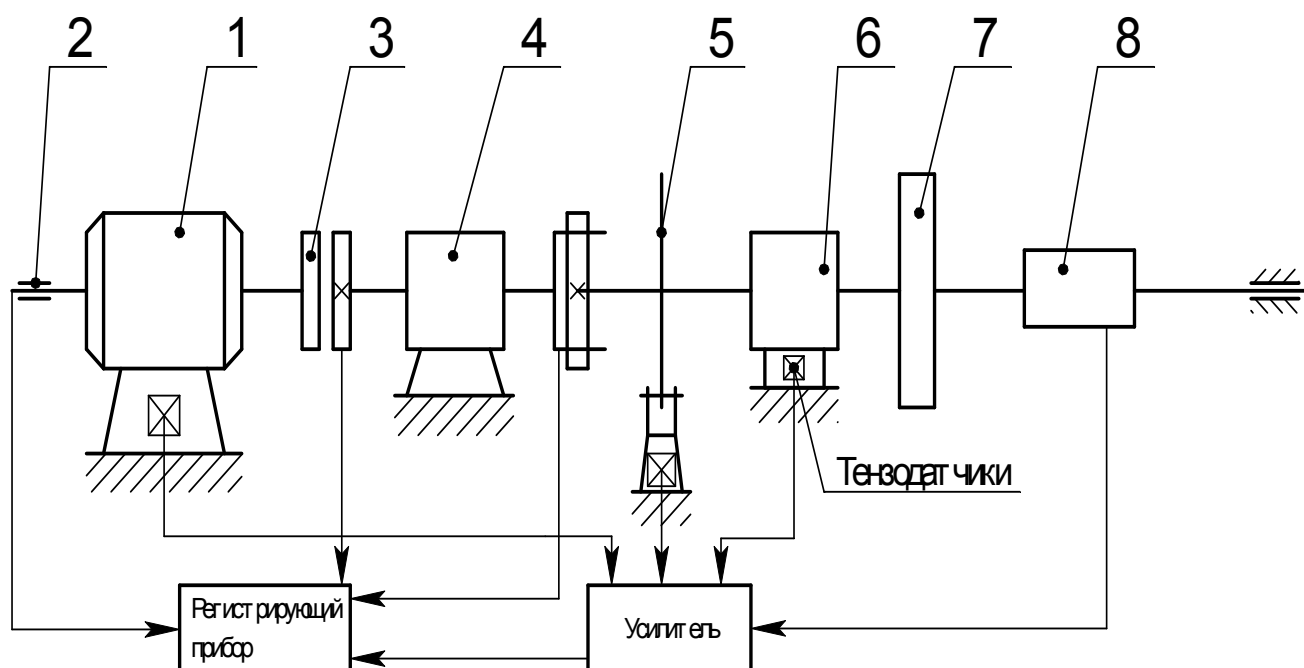


Рисунок 2 – Стенд для исследования пускозащитных муфт

Время включения муфты $t_{\text{в}} = 0,05$ с определялось экспериментально с помощью осциллограммы экстраполированием кривой $\omega_2 = \omega_2(t)$ и из условия, что ведомая полумуфта начинает свое движение, когда $T_{\text{в}} > T_{\text{с}}$, а затем уточнялось с помощью электросекундомера типа ПВ-53щ, который включался одновременно с включением электродвигателя привода. В момент начала движения ведомой полумуфты специальный штифт откидывал подвижный контакт и размыкал цепь питания электросекундомера. Из известных соображений

[2, 3] можно определить оптимальное время включения муфты $T_{\text{опт}} = 0,033$ с, которое получено из условия, что безнагрузочный разгон двигателя шел до точки характеристики, соответствующей номинальному моменту. Видно, что разгон рабочей машины (по угловой скорости ω_2) идет плавно, без рывков. Оптимальный разгон будет идти по наклонной прямой, соединяющей точки $\omega_2 = 0$ и $\omega_2 = \omega_n$, где ω_n – номинальная скорость вращения рабочей машины. Приближение действительного разгона к оптимальному характеризовалось коэффициентом $\alpha = \Delta/\omega_c$, где Δ – среднеквадратическое отклонение действительной скорости ω_2 от оптимальной во время всего разгона машины, ω_c – среднее значение угловой скорости по оптимальной характеристике. Если $\alpha = 0$, разгон близок к идеальному. В нашем случае $\alpha = 0,02$, а для агрегата с жестким соединением двигателя и рабочей машины $\alpha = 0,26$, что значительно хуже, а значит, и динамические нагрузки, действующие на машину, больше. Таким образом, пускозащитная муфта достаточно эффективно обеспечивает требуемый режим разгона машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яременко, О.В. Ограничивающие гидродинамические муфты / О.В. Яременко. – М.: Машиностроение, 1970. – 224 с.
2. Поляков, В.С. Муфты / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш. – Л.: Машиностроение, 1973. – 336 с.
3. Поляков, В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344 с.
4. Кобцев, Б.Г. Центробежная пусковая муфта / Б.Г. Кобцев, В.Н. Коськин. – Бюллетень изобретений, 1974, №9.
5. Кобцев, Б.Г. Синтез центробежной пусковой муфты / Б.Г. Кобцев, В.Н. Коськин. – М.: Известия вузов. Машиностроение, 1978, №7.
6. Коськин, В.Н. Профилирование нажимного диска пусковой дифференциальной муфты / В.Н. Коськин, Б.Г. Кобцев. – М.: Известия вузов. Машиностроение, 1979, №2.
7. Соколов, М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов. – Л.: Энергия, М., 1967. – 215 с.
8. Вейц, В.Л. Динамические расчеты приводов машин / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура, А.М. Мартыненко. – Л.: Машиностроение, 1971. – 352 с.
9. Вейц, В.Л. Динамика машинных агрегатов / В.Л. Вейц. – Л.: Машиностроение, 1969. – 368 с.
10. Марголин, М.М. Дифференциальный электропривод / М.М. Марголин. – Л.: Энергия, 1975. – 328 с.

Корнеев Юрий Степанович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-96

Корнеева Елена Николаевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-48

Гордон Владимир Александрович

Государственный университет – УНПК
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»
г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7(4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

YU.S. KORNEYEV, V.A.GORDON, E.H. OF KORNEYEV

RESEARCH OF DYNAMICS OF THE MACHINE UNIT WITH THE PUSKOZASHCHITNA COUPLING

Examines the issues of dynamic analysis of machine unit with a drive from the cage asynchronous electric motor. The moment of resistance of the working mА-bus is a constant value. As a result of analytical and experimental research of the defined time inclusion of the coupling and the dependences of the angular velocity and increasing the deposits, as well as points of loading the clutch and engine from time to time.

Keywords: machine unit, пускозащитная coupling, asynchronous power engine, the time, the technological machine.

BIBLIOGRAPHY

1. Jaremenko, O.V. Ogranichivajushhie gidrodinamicheskie mufty / O.V. Jaremenko. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 224 s.
2. Poljakov, V.S. Mufty / V.S. Poljakov, I.D. Barbash. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 336 s.
3. Poljakov, V.S. Spravochnik po muftam / V.S. Poljakov, I.D. Barbash, O.A. Rjahovskij. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 344 s.
4. Kobcev, B.G. Centrobezhnaja puskovaja mufta / B.G. Kobcev, V.N. Kos'kin. – Bjulleten' izobretenij, 1974, №9.
5. Kobcev, B.G. Sintez centrobezhnoj puskovoj mufty / B.G. Kobcev, V.N. Kos'kin. – M.: Izvestija vuzov. Mashinostroenie, 1978, №7.
6. Kos'kin, V.N. Profilirovanie nazhimmogo diska puskovoj differencial'noj mufty / V.N. Kos'kin, B.G. Kobcev. – M.: Izvestija vuzov. Mashinostroenie, 1979, №2.
7. Sokolov, M.M. Jelektromagnitnye perehodnye processy v asinhronnom jelektroprivode / M.M. Sokolov. – L.: Jenergija», M., 1967. – 215 s.
8. Vejс, V.L. Dinamicheskie raschety privodov mashin / V.L. Vejс, A.E. Kochura, A.M. Martynenko. – L.: Mashinostroenie, 1971. – 352 s.
9. Vejс, V.L. Dinamika mashinnyh agregatov / V.L. Vejс. – L.: Mashinostroenie, 1969. – 368 s.
10. Margolin, M.M. Differencial'nyj jelektroprivod / M.M. Margolin. – L.: Jenergija, 1975. – 328 s.

Korneyev Yuri Stepanovich

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-96

Gordon Vladimir Aleksandrovich

State University - UNPK

Doctor of Technical Sciences, professor, head of "Higher Mathematics"

Orel, ul. Naugorskoe Highway, 29

Tel.: 7 (4862) 41-98-48

E-mail: gordon@ostu.ru

Korneeva Elena Nikolaevna

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-48

ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМЫ «УПРУГИЙ СТЕРЖЕНЬ – ЖЕСТКОЕ ТЕЛО» И ЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ РАЗРЫВЕ СВЯЗИ

Анализируется движение механической системы «упругая пружина – жесткое тело». Пружина рассмотрена как стержень, имеющий такие же упругие свойства. Представлена волновая модель процесса движения. Для анализа процесса используется метод бегущих волн. Приведены аналитические зависимости для расчета параметров прямых и обратных волн на различных интервалах движения. Определены интервалы движения и время, когда возможен разрыв связи.

Ключевые слова: стержень, жесткое тело, неудерживающая связь, волновые процессы, метод бегущих волн, продольная волна деформации, скорость поперечных сечений, разрыв связи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения движения твердых тел в механизмах ударного действия [1, 2] используется потенциальная энергия упругой пружины. Механизм взвода периодически сжимает пружину вместе с жестким телом (бойком) и освобождает ее для разгона жесткого тела, наносящего удар. Схема взаимодействия пружины 1 с бойком 2 представлена на рисунке 1, а.

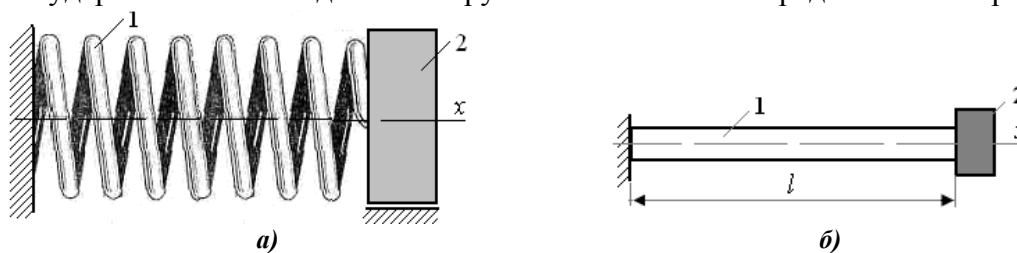


Рисунок 1 – Схема взаимодействия пружины 1 с бойком 2 и модель «стержень – жесткое тело»

При разгоне движется не только жесткое тело 2, но и витки пружины. На движение витков пружины затрачивается определенная доля накопленной потенциальной энергии. Однако эффективность удара определяется, в основном, жестким телом. Возникает задача определения скорости движения жесткого тела и параметров, определяющих этот процесс.

Динамику процесса можно проанализировать, представляя пружину как некоторый эквивалентный по упругим свойствам стержень 1 (рис. 1, б) с распределенной по длине l массой m_1 , равной массе пружины. В сечении $x = l$ стержень взаимодействует с жестким телом массой m_2 .

Такая постановка задачи рассмотрена в работе С. П. Тимошенко [3] при анализе колебаний стержня с грузом на торце. Решение предложено в виде бесконечного тригонометрического ряда, для которого необходимо определять множество корней частотного уравнения. Решение в виде бесконечного ряда при расчетах приводит к необходимости усечения ряда с введением соответствующих итерационных процедур. В известных работах практически не рассматриваются модели, связанные с учетом неудерживающей связи между стержнем и жестким телом, определением момента разрыва связи и состояния системы в момент разрыва.

В данной работе рассматривается волновой процесс движения упруго сжатого стержня и жесткого тела при неудерживающей связи, которая существует до тех пор, пока в сечении $x = l$ продольная деформация – деформация сжатия.

ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ И ЖЕСТКОГО ТЕЛА ПРИ НЕУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СВЯЗИ

В начальный момент времени стержень упруго сжат, его сечения неподвижны. Если

исчезнет усилие P_0 , удерживающее стержень в сжатом состоянии, то стержень начнет перемещать тело 2. Движение поперечных сечений стержня описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t \leq t_*, \quad a^2 = E / \rho, \quad (1)$$

где $u(x,t)$ – перемещение поперечного сечения стержня, положение которого определяется координатой x в момент времени t ;

a – скорость распространения волны в материале стержня;

t_* – время разрыва связи между стержнем и жестким телом;

E – модуль упругости материала;

ρ – плотность материала стержня.

Если стержень моделирует свойства пружины, то материал стержня – эквивалентный материал, при котором продольная жесткость стержня равна жесткости пружины:

$$EA/l = c, \quad a^2 \rho Al / l^2 = c, \quad a^2 = cl^2 / m_1, \quad m_1 = \rho Al, \quad (2)$$

где c – жесткость пружины;

A – площадь поперечного сечения стержня.

Перемещения $u(x,t)$ и скорость $v(x,t)$ поперечных сечений при $t = 0$ равны

$$u(x,0) = -\frac{P_0}{EA} \cdot x, \quad v(x,0) = \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

Граничные условия для сечений $x = 0$ и $x = l$ определяются равенствами

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial t} = 0, \quad m_2 \cdot \frac{\partial^2 u(l,t)}{\partial t^2} = -EA \cdot \frac{\partial u(l,t)}{\partial x}, \quad \text{если} \quad \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} < 0, \quad (4)$$

а также условием существования неударивающей связи

$$\frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = 0, \quad \text{если} \quad \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} \geq 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (1) по методу бегущих волн представляется в виде суммы двух неизвестных функций [4]

$$u(x,t) = f(at - x) + \varphi(at + x),$$

где $f(at - x)$ – функция, описывающая параметры волны, распространяющейся по направлению оси x (назовём её прямой волной); $\varphi(at + x)$ – функция, описывающая параметры волны, распространяющейся в обратном направлении (назовём её обратной волной).

Скорость поперечных сечений $v(x,t)$ и продольная деформация $\varepsilon(x,t)$ определяется из зависимостей

$$v(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = af'(at - x) + a\varphi'(at + x), \quad \varepsilon(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = -f'(at - x) + \varphi'(at + x), \quad (6)$$

Важно отметить следующее свойство функций $f(at - x)$ и $\varphi(at + x)$. Если t и x получают приращение Δt и Δx (причем такие, что $\Delta x = a \cdot \Delta t$), то

$$f[a(t+\Delta t) - (x+\Delta x)] = f(at - x), \quad \varphi[a(t+\Delta t) + (x-\Delta x)] = \varphi(at + x), \quad \Delta t = \Delta x / a, \quad (7)$$

т. е. параметры волны деформаций $f(at - x)$ и $\varphi(at + x)$, распространяющихся по однородному участку стержня со скоростью a , не изменяются.

Это свойство удобно использовать при расчете волновых состояний, так как, определив значение функции $f(at - x)$ в сечении x для времени t , можно использовать это значение для сечения $x + \Delta x$ в момент времени $t + \Delta t$. Определив значение функции $\varphi(at + x)$ в сечении x для времени t , можно использовать его для сечения $x - \Delta x$ в момент времени $t + \Delta t$.

Качественная картина формирования прямых и обратных волн при взаимодействии однородного стержня с жёстким телом представлена на схеме, приведенной на рисунке 2.

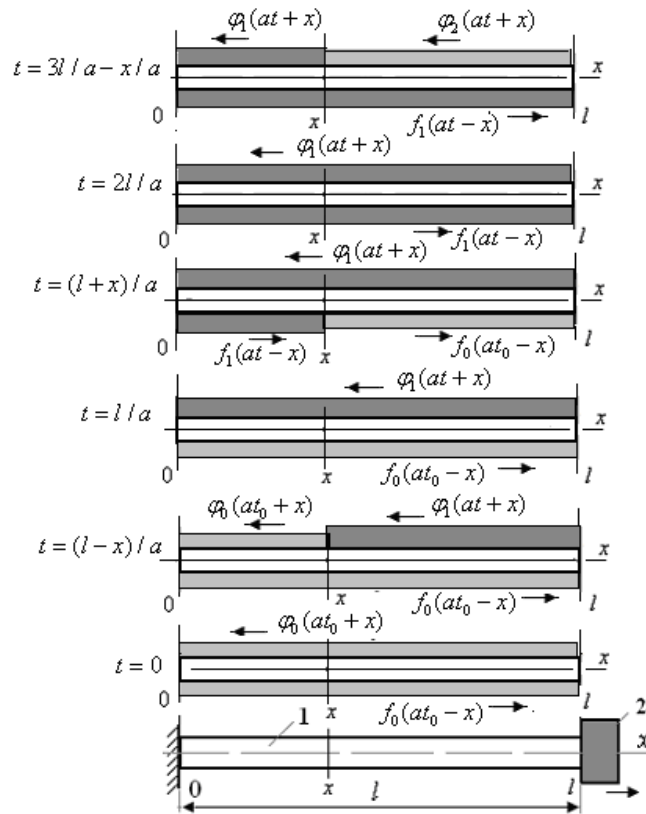


Рисунок 2 – Схема формирования волн при взаимодействии стержня с жестким телом

В начальный момент при $t=0$ стержень охвачен начальными прямой $f_0(at_0 - x)$ и обратной $\varphi_0(at_0 + x)$ волнами. В этот момент в сечении $x=l$ начинается формироваться новая обратная волна $\varphi_1(at+l)$, которая при $t=(l-x)/a$ достигнет сечения x . При $t=l/a$ все поперечные сечения стержня будут охвачены новой обратной волной $\varphi_1(at+x)$, а в сечении $x=0$ начнет формироваться новая прямая волна $f_1(at-0)$.

При $t=(l+x)/a$ новая прямая волна $f_1(at-x)$ достигнет сечения x , а при $t=2l/a$ все поперечные сечения стержня будут охвачены новой обратной волной $\varphi_1(at+x)$ и новой прямой волной $f_1(at-x)$.

При $t=2l/a$ в сечении $x=l$ начинается формироваться новая обратная волна $\varphi_2(at+l)$, которая в момент времени $t=2l/a+(l-x)/a$ достигнет сечения x . Далее цикл формирования и распространения волн повторяется.

В соответствие со схемой формирования волн (рис. 2) скорость поперечных сечений стержня на интервалах $i \cdot 2l/a$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) может быть определена как (за интервал принимаем время $2l/a$)

$$\begin{aligned} v(x,t) &= a[f'_{i-1}(at-x) + \varphi'_{i-1}(at+x)], & 0 \leq x < l-(l-x), & (i-1)2l/a \leq t < ((2i-1)l-x)/a, \\ v(x,t) &= a[f'_{i-1}(at-x) + \varphi'_i(at+x)], & l-(l-x) \leq x \leq l, & (i-1)2l/a \leq t < ((2i-1)l-x)/a, \\ v(x,t) &= a[f'_i(at-x) + \varphi'_i(at+x)], & 0 \leq x < l-(l-x), & (2i-1)l/a \leq t < ((2i-1)l+x)/a, \\ v(x,t) &= a[f'_i(at-x) + \varphi'_i(at+x)], & l-(l-x) \leq x \leq l, & (2i-1)l/a \leq t \leq ((2i-1)l+x)/a. \end{aligned} \quad (8)$$

Продольные деформации в поперечных сечениях могут быть найдены как

$$\begin{aligned} \varepsilon(x,t) &= -f'_{i-1}(at-x) + \varphi'_{i-1}(at+x), & 0 \leq x < l-(l-x), & (i-1)2l/a \leq t < ((2i-1)l-x)/a, \\ \varepsilon(x,t) &= -f'_{i-1}(at-x) + \varphi'_i(at+x), & l-(l-x) \leq x \leq l, & (i-1)2l/a \leq t < ((2i-1)l-x)/a, \\ \varepsilon(x,t) &= -f'_i(at-x) + \varphi'_i(at+x), & 0 \leq x < l-(l-x), & (2i-1)l/a \leq t \leq ((2i-1)l+x)/a, \\ \varepsilon(x,t) &= -f'_i(at-x) + \varphi'_i(at+x), & l-(l-x) \leq x \leq l, & (2i-1)l/a \leq t \leq ((2i-1)l+x)/a. \end{aligned} \quad (9)$$

Из уравнений (6) и начальных условий (3) следует:

$$f_0(at_0 - x) + \varphi_0(at_0 + x) = -P_0 \cdot x / EA, \quad a \cdot f'_0(at_0 - x) + a \cdot \varphi'_0(at_0 + x) = 0.$$

Дифференцируя по x первое равенство и учитывая второе равенство, получим

$$\varphi'_0(at_0 + x) = -\varepsilon_0 / 2, \quad f'_0(at_0 - x) = \varepsilon_0 / 2, \quad \varepsilon_0 = P_0 / (EA), \quad (10)$$

где ε_0 – модуль относительной продольной деформации стержня при $t_0 = 0$.

Дальнейшие значения прямых и обратных волн определяются из условий преобразования этих волн на границах стержневой системы и свойств функций $f(at - x)$ и $\varphi(at + x)$ из равенств (7).

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖЕСТКОГО ТЕЛА

В сечении $x = l$ формируется обратная волна. На i -м интервале движения из (8) и (9) скорость $v(l, t)$ и деформация $\varepsilon(l, t)$ в сечении $x = l$ равны

$$v(l, t) = a[f'_{i-1}(at - l) + \varphi'_i(at + l)], \quad \varepsilon(l, t) = -f'_{i-1}(at - l) + \varphi'_i(at + l), \quad (i-1)2l/a \leq t \leq i \cdot 2l/a.$$

Из граничного условия (4) с учетом данных равенств находим

$$\frac{\partial v(l, t)}{\partial t} = \frac{EA}{m_2} [f'_{i-1}(at - l) - \varphi'_i(at + l)],$$

откуда на интервалах $(i-1)2l/a \leq t \leq i \cdot 2l/a$, $i = 1, 2, 3, \dots$

$$v(l, t) = v(l, t_{0i}) + \int_{t_{0i}}^t \frac{EA}{m_2} [f'_{i-1}(at - l) - \varphi'_i(at + l)] dt, \quad (11)$$

где $v(l, t_{0i})$ – скорость сечения $x = l$ в начале i -го интервала движения;

$t_{0i} = (i-1)l/a$ – начальное время i -го интервала движения.

Учитывая, что $v(l, t) = a[f'_{i-1}(at - l) + \varphi'_i(at + l)]$, находим после дифференцирования по t обеих частей равенства (11)

$$\varphi''_i(at + l) + \alpha \cdot \varphi'_i(at + l) = \alpha \cdot f'_{i-1}(at - l) - f''_{i-1}(at - l), \quad \alpha = \frac{EA}{m_2 a^2}. \quad (12)$$

Из граничного условия (4) следует, что на i -м интервале движения для $x = 0$

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial t} = 0, \quad f'_i(at - 0) = -\varphi'_i(at + 0), \quad (2i-1)l/a \leq t < (2i+1)l/a, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

Если учесть свойства функций прямой и обратной волн (7), а также (13), то

$$f'_{i-1}(at - l) = f'_{i-1}[a(t - l/a) - 0] = -\varphi'_{i-1}[a(t - l/a) + 0], \\ \varphi'_{i-1}[a(t - l/a) + 0] = \varphi'_{i-1}[a(t - 2l/a) + l].$$

Тогда из (12) следует, что на интервале $(i-1)2l/a \leq t \leq i \cdot 2l/a$ ($i = 1, 2, 3, \dots$)

$$\varphi''_i(at + l) + \alpha \cdot \varphi'_i(at + l) = -\alpha \cdot \varphi'_{i-1}[a(t - 2l/a) + l] + \varphi''_{i-1}[a(t - 2l/a) + l]. \quad (14)$$

На первом ($i=1$) интервале движения $0 \leq t \leq 2l/a$ величина $(t - 2l/a)$ – время, предшествующее началу движения. Примем его равным $t_0 = 0$. С учетом (10) имеем из (14)

$$\varphi''_1(at + l) + \alpha \cdot \varphi'_1(at + l) = \alpha \cdot \varepsilon_0 / 2, \quad 0 \leq t \leq 2l/a. \quad (15)$$

Решение (15), обозначив $\xi = at + l$, представим в виде

$$\varphi'_1(\xi) = \varepsilon_0 / 2 - \varepsilon_0 \cdot e^{-\alpha(\xi-l)}, \quad 0 \leq t \leq 2l/a, \quad l \leq \xi \leq 3l. \quad (16)$$

Из уравнения (12) в сечении $x = l$ действует прямая волна $f'_{i-1}(at - l)$. Для первого ($i=1$) интервала $0 \leq t \leq 2l/a$ из (10) это волна $f'_0(at_0 - l) = \varepsilon_0 / 2$. Продольная деформация в сечении $x = l$ равна

$$\varepsilon(l, t) = -f'_0(at - l) + \varphi'_1(at + l) = -\varepsilon_0 \cdot e^{-\alpha at}, \quad 0 \leq t \leq 2l/a. \quad (17)$$

На первом интервале движения продольная деформация в сечении $x = l$ является отрицательной, т. е. представляет деформацию сжатия. Следовательно, на интервале $0 \leq t \leq 2l/a$ разрыва связи между стержнем и жестким телом не происходит.

На втором ($i = 2$) интервале $2l/a \leq t \leq 4l/a$ уравнение (14), у которого правая часть определяется уже найденным решением (16) для $\phi'_1(\xi)$ при $i=1$, преобразуется к виду

$$\phi''_2(\xi) + \alpha\phi'_2(\xi) = -\alpha(\varepsilon_0/2 - \varepsilon_0 e^{-\alpha(\xi-3l)}) + \alpha\varepsilon_0 \cdot e^{-\alpha(\xi-3l)}, \quad 3l \leq \xi \leq 5l.$$

Решение данного уравнения для интервала $2l/a \leq t \leq 4l/a$, $3l \leq \xi \leq 5l$

$$\phi'_2(\xi) = \phi'_2(at+l) = -\varepsilon_0/2 + \varepsilon_0[2\alpha\xi + 1 - e^{-\alpha 2l} - 6\alpha l]e^{-\alpha(\xi-3l)}. \quad (18)$$

Из уравнения (12) в сечении $x = l$ действует прямая волна $f'_{i-1}(at-l)$. Для второго ($i=2$) интервала $2l/a \leq t \leq 4l/a$, $3l \leq \xi \leq 5l$ это волна

$$f'_1(at-l) = -\phi'_1(\xi-3l) = -\varepsilon_0/2 + \varepsilon_0 \cdot e^{-\alpha(at-2l)}, \quad 2l/a \leq t \leq 4l/a, \quad 3l \leq \xi \leq 5l. \quad (19)$$

Продольная деформация в сечении $x = l$ равна

$$\varepsilon(l,t) = -f'_1(at-l) + \phi'_2(at+l) = \varepsilon_0[2\alpha(at+l) - e^{-\alpha 2l} - 6\alpha l]e^{-\alpha(at-2l)}, \quad 2l/a \leq t \leq 4l/a. \quad (20)$$

На втором интервале возможен разрыв связи, если в (20) сомножитель

$$[2\alpha(at+l) - e^{-\alpha 2l} - 6\alpha l] = 2\alpha l(at/l+1) - e^{-\alpha 2l} - 6\alpha l \geq 0.$$

Для выполнения данного неравенства необходимо, чтобы $t \geq (e^{-\alpha 2l}/2\alpha l + 2) \cdot l/a$.

Момент разрыва связи t_* определим как $t_* = (e^{-\alpha 2l}/2\alpha l + 2) \cdot l/a$. Учитываем, что $E = a^2 \rho$ (ρ – плотность материала стержня). Тогда

$$\alpha l = \frac{\rho Al}{m_2} = \frac{m_1}{m_2} = \tilde{m}, \quad t_* = (e^{-2\tilde{m}}/2\tilde{m} + 2) \cdot l/a, \quad 2l/a < t_* \leq 4l/a, \quad (21)$$

где $\tilde{m}$ – отношение массы стержня m_1 к массе жесткого тела m_2 .

Если отношение масс $\tilde{m} \rightarrow \infty$, то слагаемое $e^{-2\tilde{m}}/2\tilde{m} \rightarrow 0$, а время разрыва связи стремится $t_* \rightarrow 2l/a$ (к началу второго интервала движения). Таким образом, использование волновой модели пружины показывает, время разрыва связи конечно и не может быть меньше $2l/a$.

В то же время применение модели безынерционной пружины хотя и упрощает постановку задач динамического анализа, однако может привести к заметным отклонениям при расчете тех или иных параметров процесса.

Известно, что период колебаний T механической системы «безынерционная пружина – жесткое тело» $T = 2\pi/\omega$ (где $\omega = \sqrt{c/m_2}$ – круговая частота). Если учесть (2) и принять, что жесткость пружины $c = a^2 \rho Al/l^2 = m_1/(l/a)^2$, то период колебаний T равен

$$T = 2\pi \frac{l}{a} \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = 2\pi \frac{l}{a} \sqrt{\frac{1}{\tilde{m}}}. \quad (22)$$

При неудерживающей связи между пружиной и жестким телом (если при $t=0$ пружина была сжата) разрыв связи наступит в момент, соответствующий четверти периода:

$$t_* = T/4 = \frac{\pi l}{2a} \sqrt{\frac{1}{\tilde{m}}}, \quad \tilde{t}_* = t_*/(l/a) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{\tilde{m}}}. \quad (23)$$

Из формулы (23) следует, что при увеличении соотношения масс $\tilde{m}$ время разгона жесткого тела и контакта с пружиной (время разрыва связи $\tilde{t}_*$) сокращается и в пределе при $\tilde{m} \rightarrow \infty$ стремится к нулю. Скорость жесткого тела стремится к бесконечности, что противоречит физике процесса.

Не улучшает ситуацию рекомендуемый в работе [3] учет приведенной массы жесткого тела $m_{пр} = m_2 + m_1/3$, когда к массе жесткого тела прибавлена треть массы пружины. В

этом случае период колебаний механической системы «пружина – жесткое тело», а, соответственно, и время разрыва связи $\tilde{t}_*$ определяются как

$$T = 2\pi \frac{l}{a} \sqrt{\frac{m_2 + m_1/3}{m_1}} = 2\pi \frac{l}{a} \sqrt{\frac{1 + \tilde{m}/3}{\tilde{m}}}, \quad \tilde{t}_* = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1 + \tilde{m}/3}{\tilde{m}}}. \quad (24)$$

На рисунке 3 представлены диаграммы изменения относительного времени $\tilde{t}_* = t_*/(l/a)$ разрыва связи в зависимости от соотношения масс $\tilde{m} = m_1/m_2$ для волновой модели пружины (диаграмма 1), когда расчет $\tilde{t}_*$ выполнен по формуле (21), а также для модели пружины, когда расчет $\tilde{t}_*$ выполнен по формулам (23) – диаграмма 2 и (24) – диаграмма 3.

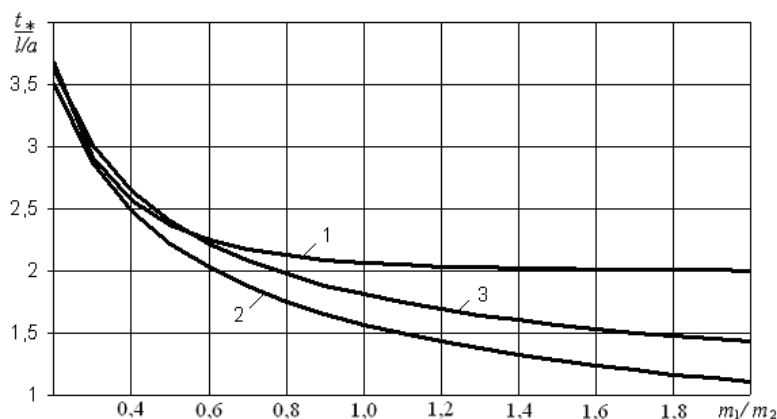


Рисунок 3 – Диаграммы изменения относительного времени разрыва связи от соотношения масс
1 – расчет $\tilde{t}_*$ по формуле (21); 2 – расчет $\tilde{t}_*$ по формуле (23); 3 – расчет $\tilde{t}_*$ по формуле (24)

Некоторое соответствие значений $\tilde{t}_*$ волновой модели и при расчете по формуле (23) наблюдается при соотношении масс $\tilde{m} < 0,4$. Соответствие значений $\tilde{t}_*$ волновой модели и при расчете по формуле (24) наблюдается при соотношении масс $\tilde{m} < 0,6$. Для соотношения масс больше приведенных значений применение модели безынерционной пружины проблематично и требует определенной корректировки.

При соотношении масс $\tilde{m} > 1,5$ относительное время разрыва связи $t_*/(l/a)$ для волновой модели практически можно принять равным 2 (различие с точным значением не превышает 1 %).

Соотношение масс $\tilde{m}$, при котором слагаемое в (21) $e^{-2\tilde{m}}/2\tilde{m} = 2$ и разрыв связи произойдет в конце второго интервала, определим как

$$e^{-2\tilde{m}}/2\tilde{m} = 2, \quad 4\tilde{m} \cdot e^{2\tilde{m}} = 1, \quad \tilde{m} \approx 0,175867.$$

Итак, соотношение масс $\tilde{m}$, при котором разрыв связи произойдет на втором интервале движения ($2l/a < t_* \leq 4l/a$) охватывает довольно широкий диапазон $0,175867 < \tilde{m} < \infty$. При соотношении масс $\tilde{m} < 0,175867$ разрыв связи произойдет на третьем и последующих интервалах движения.

Скорость жесткого тела до разрыва связи определяется скоростью сечения $x = l$:

$$v(l, t) = a[f'_0(at - l) + \varphi'_1(at + l)] = \varepsilon_0 a(1 - \exp(-\alpha l \frac{at}{l})), \quad 0 \leq \frac{at}{l} \leq 2,$$

$$v(l, t) = a[f'_1(at - l) + \varphi'_2(at + l)] = \varepsilon_0 a \left(-1 + \left[2\alpha l \frac{at}{l} + 2 - e^{-2\alpha l} - 4\alpha l \right] e^{-\alpha l (\frac{at}{l} - 2)} \right), \quad 2 \leq \frac{at}{l} \leq 4,$$

Обозначая $\tilde{v}(x, t) = v(x, t)/(\varepsilon_0 a)$, $\alpha l = m_1/m_2 = \tilde{m}$, $\tilde{t} = t/(l/a)$, получим при $x = l$ значения относительной скорости $\tilde{v}(l, t)$

$$\begin{aligned} \tilde{v}(l, t) &= 1 - \exp(-\tilde{m} \cdot \tilde{t}), & 0 \leq \tilde{t} \leq 2, \\ \tilde{v}(l, t) &= -1 + [2\tilde{m} \cdot \tilde{t} + 2 - e^{-2\tilde{m}} - 4\tilde{m}] \cdot \exp(-\tilde{m}(\tilde{t} - 2)), & 2 \leq \tilde{t} \leq 4. \end{aligned} \quad (25)$$

При соотношении масс $0,175867 < \tilde{m} < \infty$ разрыв связи произойдет в диапазоне $2l/a < t_* < 3l/a$ или в диапазоне $3l/a < t_* < 4l/a$, а скорость жесткого тела в момент разрыва связи, учитывая, что $\tilde{t}_* = e^{-2\tilde{m}} / 2\tilde{m} + 2$, определится из (22) как

$$\tilde{v}(l, t_*) = -1 + [2\tilde{m} \cdot (e^{-2\tilde{m}} / 2\tilde{m} + 2) + 2 - e^{-2\tilde{m}} - 4\tilde{m}] \cdot \exp(-\tilde{m} ((e^{-2\tilde{m}} / 2\tilde{m} + 2) - 2)) ,$$

или после преобразований

$$\tilde{v}(l, t_*) = -1 + 2 \cdot \exp(-(e^{-2\tilde{m}} / 2)) . \quad (26)$$

Чем больше соотношение масс $\tilde{m}$, тем больше $\tilde{v}(l, t_*)$. В пределе при $\tilde{m} \rightarrow \infty$ сомножитель $\exp(-(e^{-2\tilde{m}} / 2)) \rightarrow 1$ и относительная скорость $\tilde{v}(l, t_*) \rightarrow 1$.

При $t = 0$ в сжатом стержне была накоплена потенциальная энергия

$$U_0 = \frac{1}{2} EA \varepsilon_0^2 l = \frac{1}{2} a^2 \rho A \varepsilon_0^2 l = \frac{1}{2} m_1 (\varepsilon_0 a)^2 .$$

Если вся потенциальная энергия U_0 была бы преобразована в кинетическую энергию жесткого тела $T_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2(l, t_*)$, то скорость жесткого тела $v_2(l, t_*)$ в момент разрыва связи составляла бы величину, определяемую из равенства,

$$\frac{1}{2} m_1 (\varepsilon_0 a)^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2(l, t_*) , \quad v_2(l, t_*) = \varepsilon_0 a \sqrt{m_1 / m_2} , \quad \tilde{v}_2(l, t_*) = \sqrt{\tilde{m}} . \quad (27)$$

Рекомендуемый в работе [3] учет приведенной массы жесткого тела $m_{\text{пр}} = m_2 + m_1 / 3$, когда к массе жесткого тела прибавлена треть массы пружины, позволяет произвести расчет скорости жесткого тела $v_2(l, t_*)$ в момент разрыва связи, определяемой из равенства,

$$\frac{1}{2} m_1 (\varepsilon_0 a)^2 = \frac{1}{2} (m_2 + m_1 / 3) \cdot v_2^2(l, t_*) , \quad v_2(l, t_*) = \varepsilon_0 a \sqrt{\tilde{m} / (1 + \tilde{m} / 3)} , \quad \tilde{v}_2(l, t_*) = \sqrt{\tilde{m} / (1 + \tilde{m} / 3)} . \quad (28)$$

На рисунке 4 представлены диаграммы скорости жесткого тела $\tilde{v}(l, t_*)$ в момент разрыва связи в зависимости от соотношения масс $\tilde{m} = m_1 / m_2$ для волновой модели пружины (диаграмма 1), когда расчет $\tilde{v}(l, t_*)$ выполнен по формуле (26), а также для модели пружины, когда расчет $\tilde{v}(l, t_*)$ выполнен по формулам (27) – диаграмма 2 и (28) – диаграмма 3.

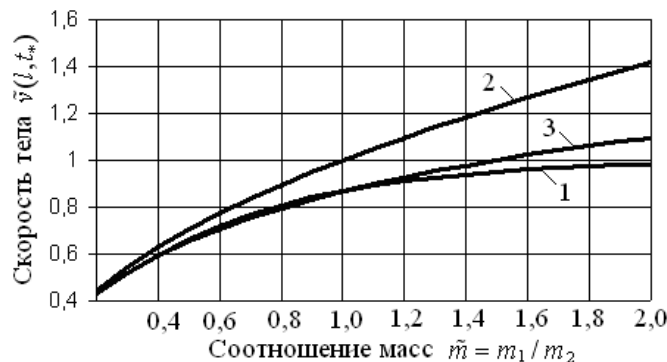


Рисунок 4 – Диаграммы скорости $\tilde{v}(l, t_*)$ жесткого тела в момент разрыва связи

1 – расчет $\tilde{v}(l, t_*)$ по формуле (26); 2 – расчет $\tilde{v}(l, t_*)$ по формуле (27); 3 – расчет $\tilde{v}(l, t_*)$ по формуле (28)

Модель безынерционной пружины приводит к завышенным значениям скорости жесткого тела $\tilde{v}(l, t_*)$ в момент разрыва связи при соотношении масс $\tilde{m} > 0,3$ (диаграмма 2). При $\tilde{m} \rightarrow \infty$ скорость жесткого тела стремится к бесконечности, что противоречит физике процесса.

Модель безынерционной пружины, когда к массе жесткого тела добавлена треть массы пружины, приводит к завышенным значениям скорости жесткого тела $\tilde{v}(l, t_*)$ в момент разрыва связи при соотношении масс $\tilde{m} > 1,2$ (диаграмма 3). При $\tilde{m} \leq 1,2$ расчет скорости

жесткого тела $v_2(l, t_*)$ в момент разрыва связи по формуле (28) практически совпадает с данными волновой модели.

ВЫВОДЫ

При взаимодействии упруго сжатой пружины и жесткого тела потенциальная энергия пружины расходуется на движение жесткого тела лишь частично. Часть потенциальной энергии остается в пружине.

Динамика процесса движения механической системы «пружина – жесткое тело» может быть проанализирована, если модель пружины представить в виде эквивалентного по упругим свойствам стержня с распределенной массой, а движение поперечных сечений описать с использованием волнового уравнения.

Применение метода бегущих волн позволяет построить математическую модель формирования обратных и прямых волн на границах стержневой системы, найти точные аналитические зависимости, определяющие параметры формируемых волн на различных интервалах движения.

При неудерживающей связи между пружиной и жестким телом определено время разрыва связи для соотношения масс $\tilde{m}$ в диапазоне $0,175867 < \tilde{m} < \infty$. При соотношении масс $\tilde{m} > 1,5$ относительное время разрыва связи $t_*/(l/a)$ для волновой модели практически можно принять равным 2 (различие с точным значением не превышает 1 %).

При соотношении масс $\tilde{m} > 0,6$ применение модели безынерционной пружины для определения времени разрыва связи проблематично и требует определенной корректировки.

Относительная скорость жесткого тела в момент разрыва связи для соотношения масс $\tilde{m}$ в диапазоне $0,175867 < \tilde{m} < \infty$ определяется как $\tilde{v}(l, t_*) = -1 + 2 \cdot \exp(-e^{-2\tilde{m}}/2)$. Модель безынерционной пружины с учетом приведенной массы жесткого тела приводит к завышенным значениям скорости жесткого тела $\tilde{v}(l, t_*)$ в момент разрыва связи при соотношении масс $\tilde{m} > 1,2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупенин, В.Л. Ударные и виброударные машины и устройства / В.Л. Крупенин // Вестник научно-технического развития. – № 4 (20). – 2009. – С. 3 – 32.
2. Манжосов, В.К. Динамика и синтез кулачковых ударных механизмов / В.К. Манжосов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 218 с.
3. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
4. Кошляков, Н.С. Дифференциальные уравнения математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1962. – 768 с.

Волынщиков Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»
аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ
Тел.: (8422) 778-264
E-mail: tpm@ulstu.ru

Манжосов Владимир Кузьмич

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ
Тел.: (8422) 778-264; 43-13-17
E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

THE MOVEMENT OF THE SYSTEM «ELASTIC ROD-RIGID BODY» AND ITS CONDITION AT RUPTURE OF THE CONTACTS

Analyzed the motion of a mechanical system «elastic spring - rigid body». Of the spring seems to be equivalent to the elastic properties of the rod. Presented model of wave motion of elastic compression rod and a rigid body with the unilateral contacts. To analyze the process of motion method of traveling waves. To give analytical dependences for calculating the parameters of forward and backward waves at different intervals of the movement. Defined intervals of movement and the time might be when possible disconnection of the contact.

Keywords: a rod, a hard body, the unilateral contact, the wave of the process, the method of traveling waves, a longitudinal wave deformation, a rate of cross-sections, a disconnection of the contact.

BIBLIOGRAPHY

1. Krupenin, V.L. Udarnye i vibroudarnye mashiny i ustrojstva / V.L. Krupenin // Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya. – № 4 (20). – 2009. – S. 3 – 32.
2. Manzhosov, V.K. Dinamika i sintez kulachkovykh udarnykh mehanizmov / V.K. Manzhosov. – Ul'janovsk: UIGTU, 2006. – 218 s.
3. Timoshenko, S.P. Kolebanija v inzhenernom dele / S.P. Timoshenko. – M.: Nauka, 1967. – 444 s.
4. Koshljakov, N.S. Differencial'nye uravnenija matematicheskoy fiziki / N.S. Koshljakov, Je.B. Gliner, M.M. Smirnov. – M.: Gos. izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962. – 768 s.

Volynchikov Sergey Yuryevich

FGBOU VPO "Ulyanovsk State Technical University"
graduate student of "Theoretical and Applied Mechanics" chair
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32, ULGTU
Ph.: (8422) 778-264
E-mail: tpm@ulstu.ru

Manzhosov Vladimir Kuzmich

FGBOU VPO "Ulyanovsk State Technical University"
Doctor of Engineering, professor, head of the department "Theoretical and applied mechanics"
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32, ULGTU
Ph.: (8422) 778-264; 43-13-17
E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

И.Ф. ШАДРИН

ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ И КРУГИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. АГРЕГАТЫ (КЛАСТЕРЫ)

Компьютерное моделирование методом Монте-Карло использовано для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней и кругов, находящихся на плоской (2d) поверхности. Поиск спонтанно возникающих структур из стержней производится по определённым правилам, применяемым к стержням, имеющим общую область контакта. Нормированная функция распределения кластеров по размерам описывается экспонентой, зависящей от числа стержней в кластере; параметры данной экспоненты и средний размер максимального кластера зависят от концентрации стержней и кругов в системе и параметров кластерообразования.

Ключевые слова: жёсткие стержни, круги, 2D-поверхность, кластер, структурообразование.

1 ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование поведения двумерной смеси жёстких анизотропных молекул (коллоидных частиц) и дисков играет важную роль в понимании жидкокристаллического поведения бинарных смесей и в нанотехнологиях, например, процессы самосборки на плоской поверхности. В отсутствие сил притяжения поведение как однородных систем, так и смесей определяется балансом энтропии.

Рассмотрение смесей анизотропных и изотропных молекул проводилось до настоящего времени в основном только для трёхмерных систем. Эффективное притяжение (depletion) в таких смесях было продемонстрировано Asakura и Oosawa [1] и Meijer и Frenkel [2] в компьютерном моделировании коллоидов и полимеров. Это поведение было ранее предсказано теоретически в работе Gast, Zal и Rassel [3] на основе теорий возмущений. Предложенный ими теоретический подход был впоследствии усовершенствован Lekkerkerker и др. [4]. Смесей анизотропных и изотропных молекул, содержащие молекулы полимеров, были изучены экспериментально и продемонстрировали богатое фазовое поведение [5-9].

Практическая потребность и существенное расхождение между аналитическими и экспериментальными данными вызвали появление прямого макроскопического экспериментального моделирования систем жёстких стержней и сфер. Например, в настоящее время имеется направление экспериментальных работ, посвящённых изучению псевдо-жидких состояний систем жёстких стержней и сфер (вибро-ожигённые) [10-12] на плоской поверхности.

Наша работа направлена на изучение и описание локальной структуры в 2d-системах анизотропных частиц и уточнение морфологической структуры, возникающих в этих системах, посредством введения структурообразующего элемента – агрегата (кластера) [13-15]. Агрегат (кластер) – это образование из рядом расположенных стержней, пространственное расположение которых согласуется с определёнными критериями. Агрегаты (кластеры) можно обнаруживать и при низких, и при высоких концентрациях стержней. В данной статье термины «агрегат» и «кластер» используются как эквивалентные друг другу. Однако можно заметить, что между ними имеются определённые различия: термин «кластер», применяется, как правило, в отношении компактного и регулярного агрегата.

2 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Нами исследовалась континуальная двумерная система твёрдых стержней (дископрямоугольников) с осевым отношением $P = L/D = 10$ (L , D – длина и диаметр стержня соответственно) и кругов с диаметром, равным стержню, между которыми имеется только объёмно-топологическое взаимодействие. Для уменьшения граничных эффектов использовались периодические граничные условия. Изучались три различных (характерных) области концентрации: низкая, средняя и плотная [15].

В настоящей работе мы используем адаптированные геометрические критерии агрегатобразования [15] к физически интерпретируемым критериям в терминах агрегации (кластерообразования) модифицированной теории Асакуры-Оосавы [10] и работ, прямо использующих энтропийное взаимодействие [10-12] (depletion interacting).

Отдельного внимания заслуживает определения понятий концентрации стержней, кругов и их общая концентрация в системе. Самая плотная регулярная упаковка кругов на плоскости нами принята за $C_{\text{круг}} = 1$, аналогично и самая плотная регулярная упаковка стержней (дископрямоугольников) – $C_{\text{стержни}} = 1$. Выпишем равновзвешенную приведённую плотность для системы стержней и кругов на плоскости для случая равенства диаметров у стержней и кругов:

$$C_{\text{система}} = \frac{D^2 \left[N_{\text{стержни}} * (0.25 * \pi + P - 1) + N_{\text{круг}} * 0.25 * \pi \right] * (N_{\text{стержни}} + N_{\text{круг}})}{M_{\text{прост}}^2 * \left(N_{\text{стержни}} * \frac{0.25 * \pi + P - 1}{\cos(30^\circ) + P - 1} + N_{\text{круг}} * \frac{0.25 * \pi}{\cos(30^\circ)} \right)}, \quad (1)$$

где $N_{\text{стержни}}$, $N_{\text{круг}}$ – соответственно, число стержней и кругов в системе; $M_{\text{прост}}$ – размер моделируемой ячейки.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения расчётов нами была выбрана система из $N = 1600$ стержней для концентраций стержней (30, 50)% и дополненных необходимым количеством кругов до соответствующей концентрации всей системы. Для концентрации стержней в 10% была выбрана

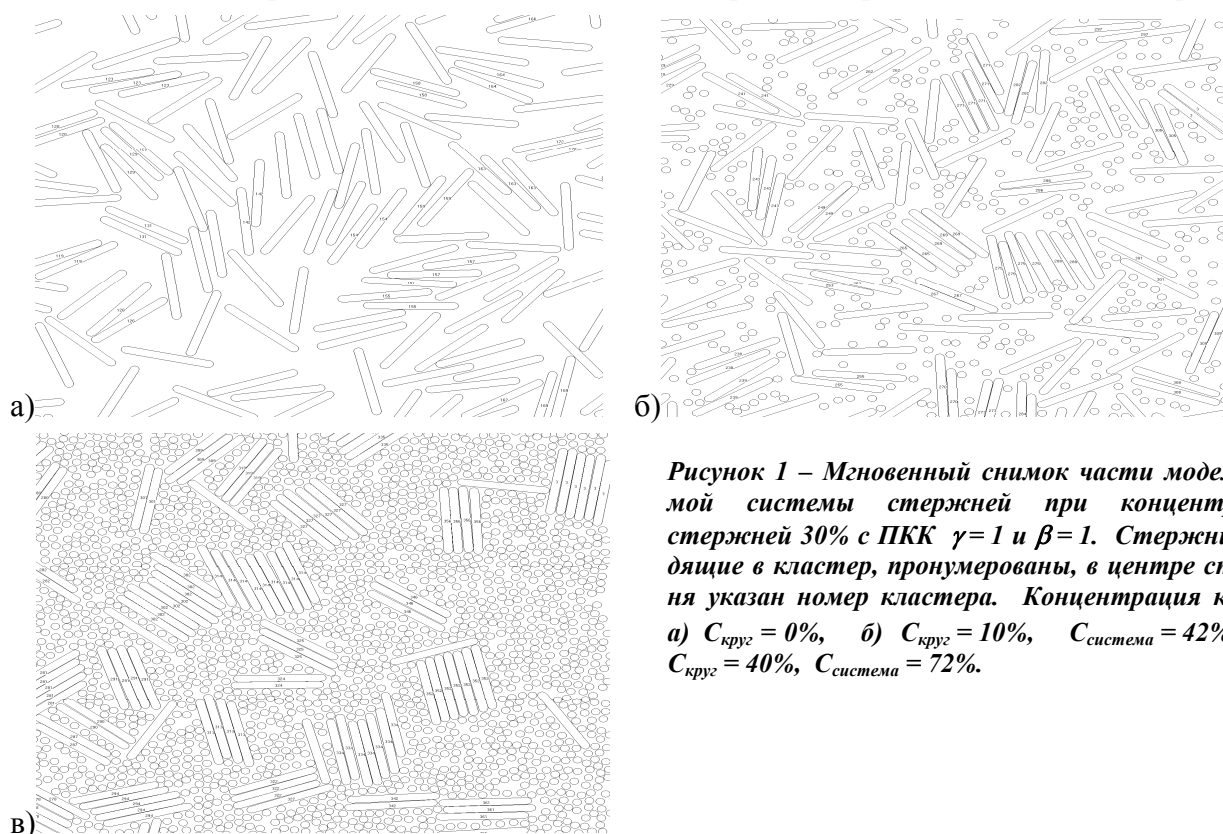


Рисунок 1 – Мгновенный снимок части моделируемой системы стержней при концентрации стержней 30% с ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$. Стержни, входящие в кластер, пронумерованы, в центре стержня указан номер кластера. Концентрация кругов: а) $C_{\text{круг}} = 0\%$, б) $C_{\text{круг}} = 10\%$, $C_{\text{система}} = 42\%$; в) $C_{\text{круг}} = 40\%$, $C_{\text{система}} = 72\%$.

система из $N = 400$ стержней и необходимого количества кругов, дополненного до соответствующей концентрации системы. На рисунке 1 представлена мгновенная конфигурация части системы на равновесном участке при плотности стержней $\rho = 0.30$ и осевом отношении $L/D = 10$ с выявленными кластерами при значениях параметров критерия кластерообразования (ПКК) $\gamma = 1.0$ и $\beta = 1.0$, в центре стержня указан номер кластера. Как видно из рисунка, с повышением концентрации кругов в системе повышается плотность и регулярность

кластеров. На рисунке 1в, с наибольшей плотностью кругов, кластеры наиболее плотные и образуют практически столбчатую структуру или «линейную молекулу» по [10].

Нами был проведён статистический анализ кластерного распределения. Полученные нормированные распределения кластеров в зависимости от числа стержней в кластере представлены на рисунке 2а при плотности стержней в системе 10% и при разных значениях плотности кругов. Как видно на рисунке 2а, нормированные распределения $R(n)$ при различных концентрациях кругов в системе хорошо линейризуются в полулогарифмических координатах, аналогично работам [13-15]. Большая дисперсия в данных наблюдается только для высокой концентрации кругов в системе, так как время релаксации подсистемы стержней значительно увеличивается, а численный эксперимент проводился для всех концентраций единообразно. Анализ распределения кластеров показал, что оно хорошо описывается функцией:

$$R(n) = A_0 \cdot \exp[-A_1 \cdot n], \quad (2)$$

где A_0 и A_1 – константы, зависящие от параметров критерия кластерообразования (ПКК) γ , β [13-15] и плотности стержней и кругов в системе; n – число стержней в кластере.

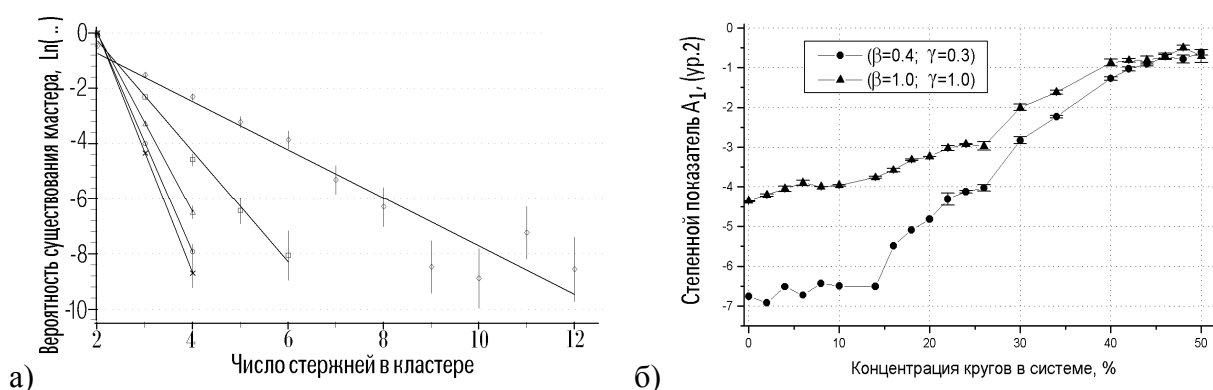


Рисунок 2 – а) Нормированные распределения $R(n)$ при концентрации стержней в системе 10%, ПКК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$ и различных концентрациях кругов: X – 0%; O – 10%; Δ – 20%; □ – 30%; ◇ – 40%; Вертикальный отрезок, проходящий через точку, среднеквадратичная ошибка среднего с достоверностью 95%. б) Поведение коэффициента A_1 , наклона графиков (ур.2)

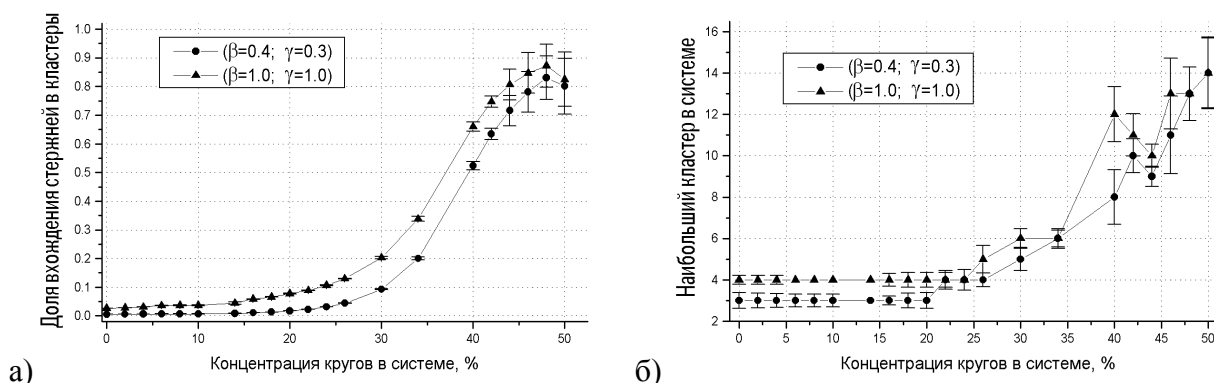


Рисунок 3 – Концентрация стержней в системе 10%. а) Доля стержней входящих в кластеры, в зависимости от концентрации кругов в системе при различных параметрах ПКК. б) Максимальный размер кластера в системе стержней и кругов

Аналогичная функциональная зависимость получена аналитически в работе [10, ур. 3, 17] для агрегатов в общем случае и имеет постоянные параметры A_0 , A_1 . Из наших публикаций [13-15] и данной работы следует, что параметры распределения (ур. 2) имеют различные значения в зависимости от критериев кластерообразования γ , β , от плотности и регулярности кластера, образующегося в системе стержней и кругов.

Как видно на рисунке 2б, показатель степени в экспоненте A_1 (ур. 2) с повышением концентрации кругов уменьшается и при высокой концентрации кругов начинает практически совпадать для различных значений ПКК. Это объясняется тем, что в системе стержней и

кругов при повышении концентрации кругов увеличиваются плотность и регулярность кластеров из стержней (см. рис. 1в) и рыхлых кластеров в системе практически нет. Доля входящих стержней в кластеры любого размера в функции плотности кругов в системе растёт нелинейно (согласно рис. 3а); имеются три области: слабого роста – до 25%, быстрого роста – от 25% до 45% и область насыщения – более 45% кругов. При увеличении плотности кругов в системе, совместно с повышением доли стержней в кластерах, растёт и средний размер максимального кластера в системе; наблюдается увеличение более чем в три раза. Также увеличивается регулярность и плотность кластеров (см. рис. 1в).

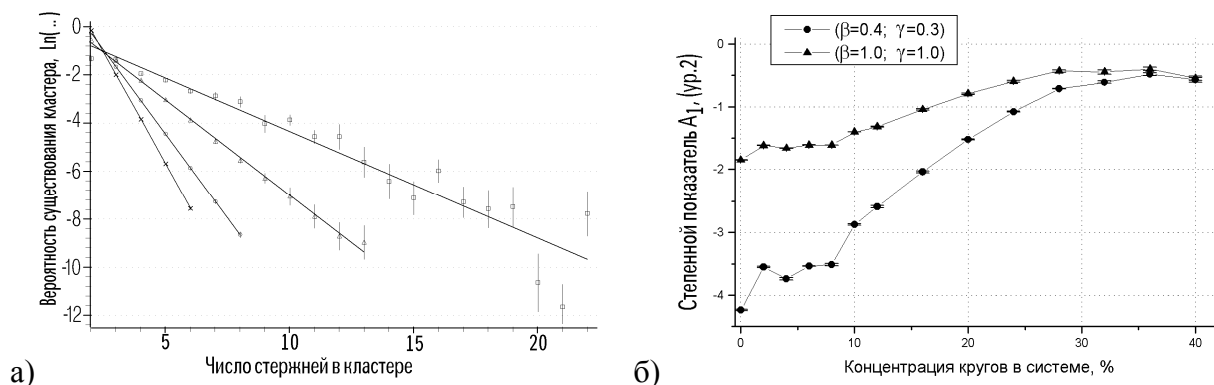


Рисунок 4 – а) Нормированные распределения $R(n)$ при концентрации стержней в системе 30%, ПСК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$ и различных концентрациях кругов: X – 0%; $\circ$ – 10%; $\triangle$ – 20%; $\square$ – 32%; Вертикальный отрезок, проходящий через точку – среднеквадратичная ошибка среднего с достоверностью 95%. б) Поведение коэффициента наклона графиков (ур.2)

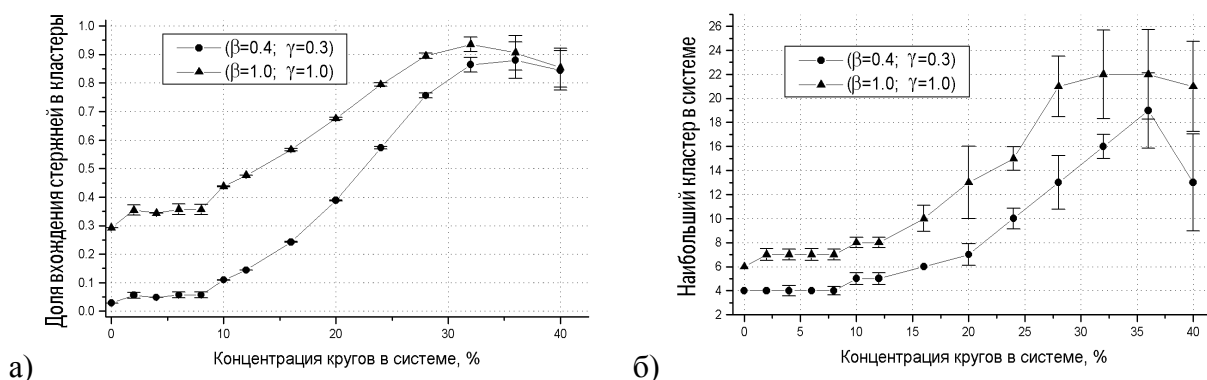


Рисунок 5 – Для концентрации стержней в 30% показана функциональная зависимость от концентрации кругов: а) доля стержней, входящих в кластеры в зависимости от концентрации кругов в системе; б) средний наибольший кластер в системе

При концентрации стержней в системе 30% с увеличением концентрации кругов функциональные зависимости аналогичны поведению системы, с концентрацией стержней 10%, хотя имеются некоторые особенности. Зависимость доли стержней, входящих в кластеры в функции концентрации кругов, характеризуются тем, что в ней можно выделить три характерные области (рис. 5а): слабого роста – до 8%, умеренного роста – от 10% до 30%, область насыщения – более 30%. Аналогично, в среднем размер максимального кластера увеличивается более, чем в три раза.

Поведение системы стержней и кругов при высокой концентрации стержней 50% в чём-то схожее, но область насыщения количественных параметров системы начинается уже при (10 ÷ 15)% концентрации кругов. Средний размер максимального кластера увеличивается более чем в два раза.

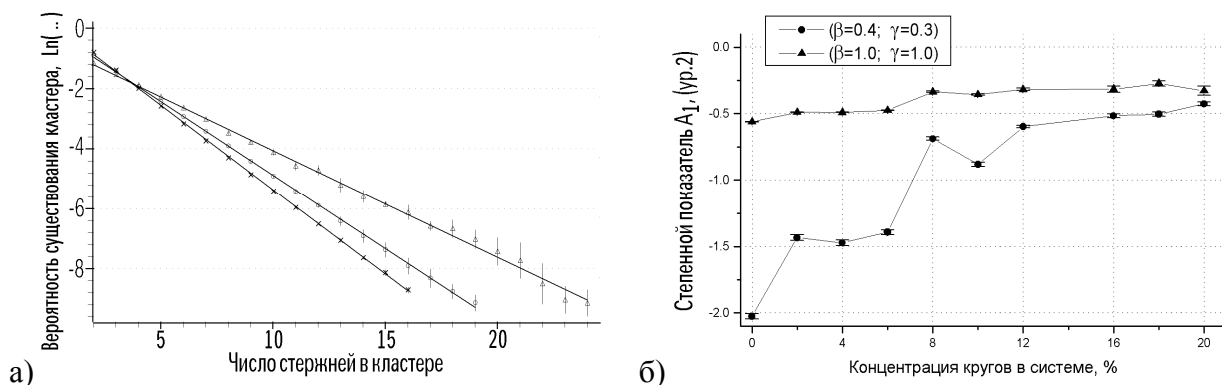


Рисунок 6 – а) Нормированные распределения $R(n)$ при концентрации стержней в системе 50%, ПМК $\gamma = 1$ и $\beta = 1$ и различных концентрациях кругов: $\times$ - 0%; $\circ$ - 4%; $\triangle$ - 10%. Вертикальный отрезок, проходящий через точку, среднеквадратичная ошибка среднего с достоверностью 95%. б) Поведение коэффициента наклона графиков (ур.2)

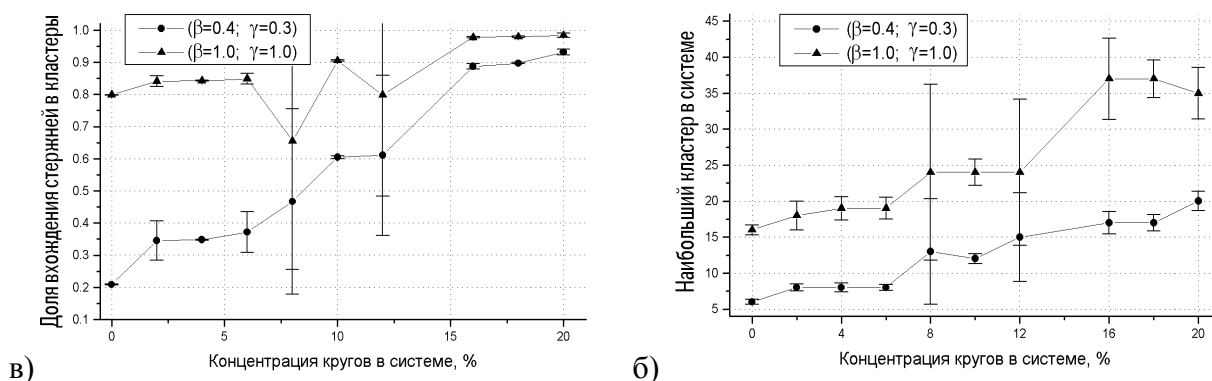


Рисунок 7 – Для концентрации стержней в 50% показана функциональная зависимость от концентрации кругов: а) доля стержней, входящих в кластеры в функции концентрации кругов в системе; б) средний наибольший кластер в системе

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые численные эксперименты показали, что в 2d-системе стержней и кругов образуются кластеры различной степени плотности и размеров, причём они образуются как при низкой, так и при высокой концентрации кругов. Параметры кластерной статистики изменяются непрерывно и монотонно в функции концентрации кругов, аналогично чистой системе стержней [13-15] при повышении её концентрации, но отмечается определённая специфика. При низкой и средней концентрациях стержней (10 и 30)% имеются три области влияния концентрации кругов на количественные характеристики системы стержней: области слабого и сильного влияния концентрации кругов, область насыщения. Причём если перейти на средневзвешенную концентрацию системы стержней и кругов, то эти области практически одинаковы по функциональной зависимости от концентрации кругов: слабого роста – до (35-40)% концентрации системы, быстрого роста – от 40% до 55% и область насыщения – более 55%. При концентрации стержней 50% система из стержней и кругов проходит только две области по функциональной зависимости от концентрации кругов – среднего роста и область насыщения. Кластеры, образующиеся при больших значениях концентрации кругов, становятся более регулярными, плотными и большими по размерам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asakura, S. On interaction between two bodies immersed in a solution of macromolecules / S. Asakura, F. Oosawa // J. Chem. Phys. 22, 1255–1256, 1954.
2. Meijer, E.J. Colloids dispersed in polymer-solutions - a computer-simulation study / E. J. Meijer, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 100, 6873-6887 (1994)

3. Gast, A.P. Polymer Induced Phase Separations in NonAqueous Colloidal Suspensions / A.P. Gast, C.K. Hall, W.B. Russel // J. Coll. Int. Sci. 96, 251–267 (1983).
4. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of colloid + polymer mixtures. /H.N.W. Lekkerkerker, W.C.K. Poon, P.N. Pusey, A. Stroobants, P.B. Warren // Europhys. Lett. 20 (1992) 559.
5. Adams, M.Z. Entropically driven microphase transitions in mixtures of colloidal rods and spheres / M. Adams, Z. Dogic, S.L. Keller, S. Fraden // Nature 393:349, 1998 May 28.
6. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase diagram of a mixture of spherical and rodlike colloids. / P.G. Bolhuis, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 101:9869-9875 (1994)
7. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of rod-like + flexible polymer mixtures / H.N.W. Lekkerkerker, A. Stroobants // Nuovo Cimento 16, 949 (1994).
8. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase behavior of rodlike colloids with attractive interactions. / P.G. Bolhuis, A. Stroobants, D. Frenkel, H.N.W. Lekkerkerker // J.Chem.Phys. 107, 1551 (1997)
9. Vliegenthart, G.A. Phase behavior of colloidal rod-sphere mixtures / G.A. Vliegenthart, H.N.W. Lekkerkerker // J. of Chem. Phys. 111, 4153 (1999)
10. Galanis, J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Текст] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
11. Daniels, L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Текст] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
12. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Текст] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
13. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Текст] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J.Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
14. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. – №3 (203). – С.3-9.
15. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры II [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. – №4 (294). – С.14-20.

Шадрин Иван Фёдорович

Госуниверситет - УНПК, г.Орел
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. 8 (4862) 41-98-89
E-mail: Ivshadr@mail.ru

I.F. SHADRIN

HARD STICKS AND CIRCLES IN THE TWO-DIMENSIONAL SURFACE. UNITS (CLUSTERS)

Computer modeling by the Monte-Carlo method it is used for studying of local structure in system of firm cores and the circles being on flat (2d) to a surface. Search of spontaneously arising structures from cores, is made by the certain rules applied to cores, having the general area of contact. Normirovanny function of distribution of clusters in the sizes is described exponents depending on number of cores in a cluster, parameters given exhibitors and the average size of the maximum cluster depend on concentration of cores and circles in system and cluster formation parameters.

Keywords: rigid cores, circles, 2D-surface, cluster, structurization.

BIBLIOGRAPHY

1. Asakura, S. On interaction between two bodies immersed in a solution of macromolecules / S. Asakura, F. Oosawa // J. Chem. Phys. 22, 1255–1256, 1954.
2. Meijer, E.J. Colloids dispersed in polymer-solutions - a computer-simulation study / E. J. Meijer, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 100, 6873-6887 (1994)
3. Gast, A.P. Polymer Induced Phase Separations in NonAqueous Colloidal Suspensions / A.P. Gast, C.K. Hall, W.B. Russel // J. Coll. Int. Sci. 96, 251–267 (1983).
4. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of colloid + polymer mixtures. /H.N.W. Lekkerkerker, W.C.K. Poon, P.N. Pusey, A. Stroobants, P.B. Warren // Europhys. Lett. 20 (1992) 559.
5. Adams, M.Z. Entropically driven microphase transitions in mixtures of colloidal rods and spheres / M. Adams, Z. Dogic, S.L. Keller, S. Fraden // Nature 393:349, 1998 May 28.

6. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase diagram of a mixture of spherical and rodlike colloids. / P.G. Bolhuis, D. Frenkel // J. Chem. Phys. 101:9869-9875 (1994)
7. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of rod-like + flexible polymer mixtures / H.N.W. Lekkerkerker, A. Stroobants // Nuovo Cimento 16, 949 (1994).
8. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase behavior of rodlike colloids with attractive interactions. / P.G. Bolhuis, A. Stroobants, D. Frenkel, H.N.W. Lekkerkerker // J.Chem.Phys. 107, 1551 (1997)
9. Vliegenthart, G.A. Phase behavior of colloidal rod-sphere mixtures / G.A. Vliegenthart, H.N.W. Lekkerkerker // J. of Chem. Phys. 111, 4153 (1999)
10. Galanis, J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Tekst] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
11. Daniels, L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Tekst] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
12. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Tekst] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
13. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Tekst] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J.Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
14. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klastery [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012. – №3 (203). – S.3-9.
15. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klastery II [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012. – №4 (294). – S.14-20.

Shadrin Ivan Fyodorovich

State university - UNPK. Orel

edging. the physical. - a mat. sciences, associate professor of "Physicist"

Orel, Naugorskoye Highway, 29

Ph. 8 (4862) 41-98-89

E-mail: Ivshadr@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 664.7:631.363.28:621.979.2

И.Т. КОВРИКОВ, А.С. КИРИЛЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФИЛЬЕРАХ МАТРИЦЫ ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРА

В статье представлена математическая модель напряженного состояния упругопластического растительного материала при его движении в цилиндрических фильерах матрицы пресс-гранулятора экструзионного типа. Модель уточнена, исходя из предположения о наличии на контактной поверхности формирующей полости фильеры трех участков, на которых реализуются разные условия распределения контактных касательных напряжений и условия пластичности. В результате анализа влияния на сопротивление фильеры ее относительной длины сделан вывод, что разработанная математическая модель обеспечивает при проектировании пресс-грануляторов более точное и корректное определение их критериев оптимизации по сравнению с существующей моделью.

Ключевые слова: пресс-гранулятор; математическая модель; фильера матрицы; осесимметричное напряженное состояние; приближенное условие пластичности; относительная длина фильеры; сопротивление фильеры; давление экструзии.

В настоящее время активно развиваются существующие и разрабатываются новые промышленные направления, где находят широкое применение технологии прессового гранулирования предварительно измельченных материалов в пресс-грануляторах экструзионного типа с цилиндрическими рабочими органами. Специалистами [1] обоснована возможность гранулирования более 5000 различных видов сырья.

В сфере АПК наиболее распространены вальцово-матричные пресс-грануляторы с кольцевыми и плоскими матрицами, перфорированными осесимметричными цилиндрическими фильерами [2]. В таких прессах осуществляют переработку агросырья, главным образом, при производстве гранулированных комбикормов и их отдельных компонентов, а также с целью получения гранулированных промежуточных продуктов для повышения эффективности дальнейшего технологического процесса (например, гранулирование жмыха перед экстракцией на маслоэкстракционных заводах).

Совершенствование нелинейного многопараметрического процесса прессового гранулирования предполагает разработку адекватной комплексной математической модели, связывающей (через напряженное состояние обрабатываемого материала на контактных поверхностях рабочих органов) технологические параметры процесса, реологические свойства сырья, конструктивные и кинематические параметры пресс-гранулятора с его критериями оптимизации [3].

Важным этапом исследования является описание напряженного состояния прессуемого материала при его движении в фильерах матрицы пресс-гранулятора, где происходит формообразование и консолидация материала в гранулы. Обрабатываемый материал поступает в фильеры из клиновидного рабочего пространства между контактными поверхностями матрицы и прессующего ролика. При установившемся технологическом процессе выдавливание предварительно сжатого слоя материала через фильеры осуществляется только в определенной части клиновидного пространства – зоне экструзии. В граничных сечениях данной зоны нормальные (относительно рабочей поверхности матрицы) напряжения в материале, создаваемые в клиновидном пространстве силами давления рабочих органов, достигают значений, равных сопротивлению фильер матрицы [4], [5]. Таким образом, сопротивление фи-

льер, связывающее их конструктивные параметры с конструктивными параметрами клиновидного пространства, равно давлению, необходимому и достаточному для выпрессовывания гранул (давлению экструзии).

Сопротивлением фильер определяются границы зоны экструзии, от координат которых, в свою очередь, зависят производительность, мощность пресс-гранулятора, силы, действующие на рабочие органы, а также прочностные характеристики гранул [3], [5]. Кроме того, сопротивлением фильер определяется плотность гранул. Следовательно, при проектировании пресс-грануляторов с цилиндрическими рабочими органами и обосновании их параметров является важным корректное определение давления экструзии. Степень соответствия этого давления действительным значениям сопротивления фильер может быть установлена экспериментально – в результате верификации комплексной математической модели процесса прессового гранулирования по каким-либо критериям оптимизации, например, производительности и мощности пресс-гранулятора.

Чтобы определить величину давления экструзии, которое зависит от состава, структурно-механических свойств прессуемого сырья, конструктивных параметров фильер, а также условий контакта материала с их рабочими поверхностями, требуется рассмотреть движение материала в фильере. Эту задачу обычно решают как осесимметричную [4], [6-12].

Прессуемый материал в фильере будем считать сплошной квазиизотропной средой, обладающей свойствами упругопластического деформируемого твердого тела с изменяющимся пределом текучести. Возможность распространения этого научного положения на процесс гранулирования растительного сырья и преимущества его применения обоснованы различными авторами [4], [11], [13].

Ранними исследователями [4], [11] установлено, что переменный предел текучести τ_s при сдвиге прессуемого растительного материала представляет собой экспоненциальную функцию от напряжения всестороннего сжатия (гидростатического напряжения) σ_c :

$$\tau_s = \tau_{s0} \exp \beta \sigma_c, \quad (1)$$

где τ_{s0} – предел текучести сдвига прессуемого материала при атмосферном давлении, Па;

$\beta > 0$ – коэффициент всестороннего давления, Па^{-1} .

Фрикционные свойства растительного материала в фильерах характеризуются коэффициентом контактного трения f , зависимость которого от контактного нормального напряжения σ_n в условиях высокого всестороннего давления имеет вид [4]:

$$f = \tau_0 + f_1 \sigma_n + f_2 \sigma_n^2, \quad (2)$$

где τ_0 , Па, и f_1 – коэффициенты, зависящие от молекулярного взаимодействия прессуемого материала и контактной поверхности;

f_2 – коэффициент, учитывающий деформационное воздействие частиц прессуемого материала на упругую контактную поверхность, Па^{-1} .

Реологические параметры τ_{s0} , β , τ_0 , f_1 и f_2 зависят от конкретного состава сырья, его температуры и относительной влажности подготовленного полуфабриката и определяются экспериментально [12].

При осесимметричной форме фильеры образующая ее контактной поверхности обычно состоит из нескольких участков прямых или кривых линий. Это позволяет выделять в фильере входную, формующую и выходную полости [2], [14]. В матрицах рассматриваемых пресс-грануляторов формующая полость является основной.

Пусть фильера, схема которой представлена на рисунке 1, состоит из двух обязательных элементов: входной полости 1 с переменным диаметром D и формующей полости 2 в виде открытого цилиндрического канала диаметром $D_\phi = \text{const}$ и длиной l_ϕ . Отнесем фильеру к цилиндрической системе координат (r, φ, z) с полюсом в точке O_ϕ , лежащей на оси

симметрии канала прессования в плоскости выходного сечения формующей полости. Ось $O_\phi z$ направим в сторону входной полости фильеры.

Будем полагать, что в пресс-грануляторе режим прессования консолидируемого в фильере предварительно сжатого материала соответствует его установившемуся и непрерывному движению. Это предположение правомерно для вальцово-матричных пресс-грануляторов, поскольку они, как правило, характеризуются высокой частотой воздействий прессующих роликов на запрессованный в фильеры материал.

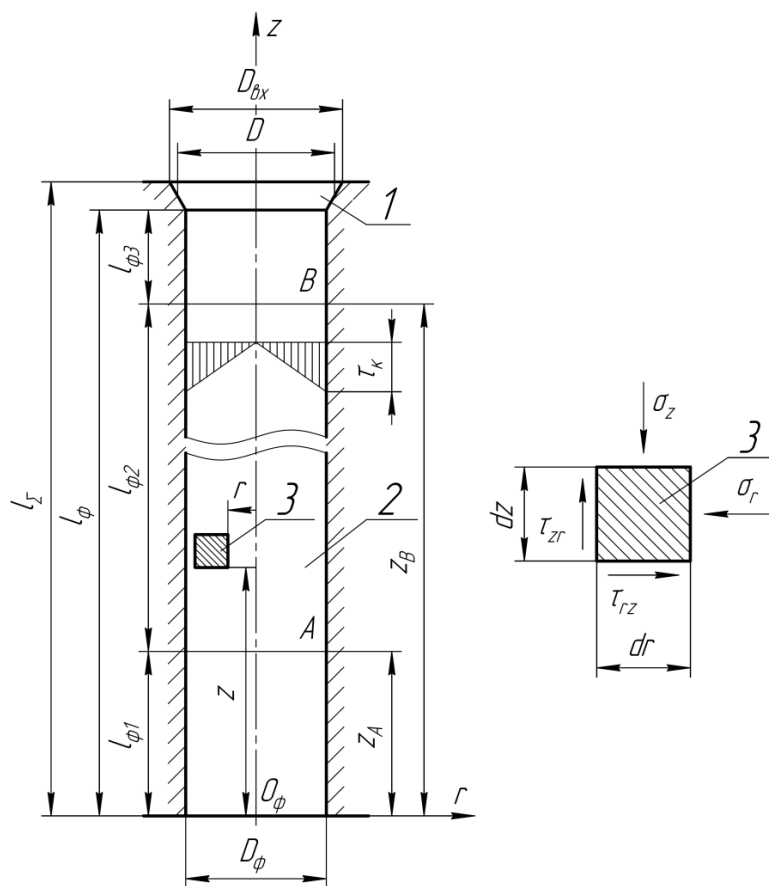


Рисунок 1 – Схема напряженного состояния прессуемого материала в цилиндрической фильере матрицы
1 – входная полость; 2 – формующая полость; 3 – элементарный объем прессуемого материала

В рамках поставленной задачи массовыми силами (величинами третьего порядка малости), возникающими при движении материала в фильере, можно пренебречь по сравнению с компонентами девиатора напряжений. Тогда уравнение движения обрабатываемого материала будет совпадать с уравнением равновесия в виде

$$\operatorname{div} T_\sigma = 0, \quad (3)$$

где T_σ – тензор напряжений в прессуемом материале, составленный для схемы осесимметричного напряженного состояния.

В данном случае напряжения не зависят от угловой координаты φ , а для касательных напряжений, приложенных к площадкам выделенного в фильере элементарного объема 3 прессуемого материала (рисунок 1), справедливы условия $\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \tau_{z\varphi} = \tau_{\varphi z} = 0$ и $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ [6], [8].

Тогда уравнение (3) для формующей цилиндрической полости приводится к следующей системе точных дифференциальных уравнений равновесия (сжимающие нормальные напряжения считаем положительными):

$$\begin{cases} -\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} - \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где σ_r , σ_φ , σ_z – соответственно нормальные радиальные, тангенциальные и осевые напряжения в материале, находящемся в фильере, Па.

Для решения данной осесимметричной задачи целесообразно применить инженерный метод [6-8]. Этот метод предполагает определение нормальных и касательных напряжений не в каждой точке объема деформируемого материала, а только на контактных поверхностях с использованием приближенного уравнения равновесия и условий пластичности.

Допустим, что напряжения σ_r и σ_z не зависят от координаты r , то есть равномерно распределены по плоскости сечения, перпендикулярного оси $O_\Phi z$. На контактной поверхности формирующей полости $\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{d\sigma_r}{dr}$ и $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{d\sigma_z}{dz}$. Касательные напряжения τ_{zr} на оси симметрии цилиндрического канала (при $r = 0$) равны нулю, а на контактной поверхности (при $r = \frac{D_\Phi}{2}$) их значения равны τ_k . Считая $\tau_{zr}(r)$ линейной функцией, такой что

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} = \frac{2\tau_k}{D_\Phi},$$

из второго уравнения системы (4) получим приближенное дифференциальное уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{4\tau_k}{D_\Phi} = 0. \quad (5)$$

При решении уравнения (5) будем исходить из того, что в каждом поперечном сечении формирующей полости прессуемый материал находится в упругопластическом состоянии. При этом контактная поверхность цилиндрического канала вдоль оси $O_\Phi z$ разделяется на участки в зависимости от граничных условий, наложенных на контактные касательные напряжения τ_k , величиной которых задается распределение нормальных напряжений в материале. Участки обуславливают границы применимости приближенных условий пластичности, связывающих нормальные напряжения σ_r и σ_z в материале при его переходе в упругопластическое состояние.

Точное цилиндрическое условие пластичности для осесимметричного напряженного состояния при полной пластичности (в фильере $\sigma_r = \sigma_\varphi$, поскольку относительные деформации $\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi = 0$) имеет вид [6], [8]:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{\sqrt{3}\tau_s} = \pm \sqrt{1 - \frac{\tau_k^2}{\tau_s^2}}. \quad (6)$$

Соответствующее условию (6) приближенное условие пластичности имеет вид:

$$\sigma_z - \sigma_r = \pm \sqrt{3}\tau_s.$$

В нашем случае нормальное осевое напряжение σ_z не превосходит радиальное σ_r в любой момент нагружения, следовательно,

$$\sigma_z - \sigma_r = -\sqrt{3}\tau_s. \quad (7)$$

При $\tau_k \rightarrow \tau_s$, как показал Е.П. Унков [6] и как следует из выражения (6), условие пластичности запишется в виде:

$$\sigma_z - \sigma_r = 0. \quad (8)$$

И в теории обработки металлов давлением, и в теории прессового гранулирования растительного сырья исследователи определяли напряженное состояние упругопластического материала в фильтре в условиях высокого всестороннего давления, принимая, что на ее контактной поверхности имеют место два участка [4], [6], [8], [11]. На первом участке (считая от выходного сечения формующей полости) предполагали, что для касательных напряжений справедлив закон Кулона:

$$\tau_k = f \sigma_r. \quad (9)$$

Для данного участка использовали условие пластичности (7). На втором участке контактные касательные напряжения принимали максимальными, равными пределу текучести τ_s :

$$\tau_k = \tau_s. \quad (10)$$

Для этого участка применяли условие пластичности (8).

Однако, по мнению Е.П. Унксова, с учетом погрешности при использовании приближенных условий пластичности выражение (7) можно считать действительным только при $0 \leq \tau_k \leq \frac{\pi}{4} \tau_s$, а выражение (8) – в случае $\frac{\pi}{4} \tau_s \leq \tau_k \leq \tau_s$ [7], [8].

Тогда на контактной поверхности формующей полости целесообразно рассматривать не два, а три участка (рисунок 1). Таким образом, существующую математическую модель напряженного состояния растительного материала в цилиндрическом канале фильтры необходимо уточнить.

Поскольку при непрерывном режиме прессования $\sigma_z \leq \sigma_r$, считаем, что напряжение всестороннего сжатия σ_c определяется величиной нормальных осевых напряжений σ_z :

$$\sigma_z = \sigma_c. \quad (11)$$

Кроме того, считаем, что в выходном сечении формующей полости, то есть при $z = 0$ напряжения $\sigma_{z0} = 0$ и $\sigma_{r0} = \sqrt{3} \tau_{s0}$ [6], [8].

На первом участке при $0 \leq z \leq z_A$ (область скольжения) касательные напряжения τ_k изменяются по закону Кулона (9) в диапазоне $f \sigma_{r0} \leq \tau_k \leq \frac{\pi}{4} \tau_s$. Коэффициент трения f в уравнении (9) определяется по формуле (2), где $\sigma_n = \sigma_r$. Условие пластичности принимаем в виде (7).

Решение дифференциального уравнения (5) для первого участка с учетом (1), (2), (7), (9) и (11) получено в виде:

$$\int_0^z \frac{d\sigma_z}{\tau_0 + f_1 \cdot (\sigma_z + \sqrt{3} \tau_{s0} \exp \beta \sigma_z) + f_2 \cdot (\sigma_z + \sqrt{3} \tau_{s0} \exp \beta \sigma_z)^2} = 4 \frac{z}{D_\Phi}. \quad (12)$$

Решение интеграла (12) с верхним переменным пределом осуществляется численно.

В граничном сечении $z = z_A$ необходимо выполнение условия непрерывности контактных касательных напряжений:

$$f \cdot (\sigma_{z_A} + \sqrt{3} \tau_{s0} \exp \beta \sigma_{z_A}) = \frac{\pi}{4} \tau_{s0} \exp \beta \sigma_{z_A}. \quad (13)$$

Коэффициент трения f , входящий в уравнение (13), задается формулой (2) с учетом условия пластичности (7). Определив из (13) значение нормального осевого напряжения σ_{z_A} , подставив его в интеграл (12) и решив последний относительно сечения $z = z_A$, получим осевую координату точки А и, следовательно, осевую протяженность первого участка $l_{\Phi 1} = z_A$.

На втором участке при $z_A \leq z \leq z_B$ (область скольжения) касательные напряжения τ_k также изменяются по закону Кулона (9), при этом $\frac{\pi}{4}\tau_s \leq \tau_k \leq \tau_s$. Условие пластичности принимаем в виде (8).

Решение дифференциального уравнения (5) для второго участка с учетом (1), (2), (8), (9) и (11) может быть представлено следующими выражениями. При условии $f_1^2 > 4f_2\tau_0$:

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{\zeta}}{f_2} \left[1 - \left(1 - \frac{2\sqrt{\zeta}}{2f_2\sigma_{z_A} + f_1 + \sqrt{\zeta}} \right) \exp \left(4\sqrt{\zeta} \frac{z - z_A}{D_\Phi} \right) \right]^{-1} - \frac{f_1 + \sqrt{\zeta}}{2f_2}, \quad (14)$$

где $\zeta = f_1^2 - 4f_2\tau_0$.

При условии $f_1^2 < 4f_2\tau_0$:

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{-\zeta}}{2f_2} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{2f_2\sigma_{z_A} + f_1}{\sqrt{-\zeta}} \right) + 2\sqrt{-\zeta} \frac{z - z_A}{D_\Phi} \right] - \frac{f_1}{2f_2}. \quad (15)$$

В случае $f_1^2 = 4f_2\tau_0$ решение можно получить из (14) предельным переходом при $\zeta \rightarrow 0$.

Нормальное осевое напряжение σ_{z_B} в граничном сечении $z = z_B$ определяется из условия непрерывности контактных касательных напряжений:

$$f\sigma_{z_B} = \tau_{s0} \exp \beta \sigma_{z_B}. \quad (16)$$

Коэффициент трения f , входящий в уравнение (16), задается формулой (2) с учетом условия пластичности (8). Подставив значение σ_{z_B} в одно из трансцендентных уравнений (14) или (15) и решив его относительно сечения $z = z_B$, найдем предел существования функций (14), (15), то есть осевую координату точки B , а затем длину второго участка $l_{\Phi 2} = z_B - z_A$.

На третьем участке при $z_B \leq z \leq l_\Phi$ (область торможения) касательные напряжения τ_k максимальны, то есть действует условие (10). Однако из результатов экспериментальных исследований следует, что этот участок (при пластической деформации растительного сырья) характеризуется скольжением прессуемого материала по контактной поверхности фильеры. То есть в рабочей фильере прилипание (в кинематическом смысле) пристенного слоя материала отсутствует. Условие пластичности принимаем в виде (8).

Решение дифференциального уравнения (5) для третьего участка с учетом (1), (8), (10) и (11) получено в виде:

$$\sigma_z = -\frac{1}{\beta} \ln \left[\exp(-\beta \sigma_{z_B}) - 4\beta \tau_{s0} \frac{z - z_B}{D_\Phi} \right]. \quad (17)$$

Подставив в выражение (17) координату граничного сечения между формующей и входной полостями фильеры, то есть $z = l_\Phi$, получим величину сопротивления формующей полости фильеры σ_{l_Φ} . Длина третьего участка составит $l_{\Phi 3} = l_\Phi - z_B$.

Если значение z_A или z_B окажется больше l_Φ , то напряженное состояние материала в формующей полости определяется в одном случае условиями для первого участка, в другом – для первого и второго участков. Иногда состояние контактной поверхности фильеры может быть нарушено поперечными неровностями, обусловленными остатками продукта или механическим повреждением поверхности. В этом случае формующая полость будет состоять только из одного участка с условием (10) и ее сопротивление в каждом поперечном

сечении будет иметь максимальные для данных свойств сырья значения. Решение дифференциального уравнения (5) примет вид:

$$\sigma_z = -\frac{1}{\beta} \ln \left[1 - 4\beta\tau_{s0} \frac{z}{D_\Phi} \right]. \quad (18)$$

В выражениях (12), (14), (15), (17) и (18) отношение z/D_Φ представляет собой переменную относительную длину цилиндрического канала прессования, по значению которой можно сравнивать сопротивление нескольких фильер. Кроме того, по величине предельной относительной длины формирующей полости $(l_\Phi/D_\Phi)_{adm}$ (когда напряжение σ_z неограниченно возрастает) целесообразно характеризовать степень сопротивления прессованию для различных видов сырья с разными реологическими параметрами. Значение $(l_\Phi/D_\Phi)_{adm}$ можно получить, приравняв в формулах (17) и (18) нулю выражения, находящиеся под знаком натурального логарифма.

На диаграммах, приведенных на рисунке 2, показано влияние относительной длины цилиндрической формирующей полости фильеры на ее сопротивление экструзии, а также представлено распределение касательных напряжений на контактной поверхности фильеры. В качестве примера рассмотрен комбикорм, имеющий следующие реологические параметры: $\tau_{s0} = 0,981$ МПа, $\beta = 0,032$ МПа⁻¹, $\tau_0 = 0,7$ МПа, $f_1 = 0,008$ и $f_2 = 0,0015$ МПа⁻¹ [4]. Диаграммы 1 и 1а построены по зависимостям (7) – (17) уточненной модели. Диаграммы 2 и 2а получены по зависимостям существующей модели [4], [11]. Предельный случай для данного комбикорма в соответствии с (10) и (18) представлен диаграммами 3 и 3а.

Из анализа диаграмм видно, что в каждом поперечном сечении формирующей полости, начиная со второго участка, ее сопротивление σ_z , рассчитанное по уточненной модели, ниже по сравнению со значением σ_z , рассчитанным по существующей модели. С ростом относительной длины z/D_Φ эта разница увеличивается и, например, при $z/D_\Phi = 8$ составляет более 21%. Между тем, матрицы современных пресс-грануляторов имеют в основном значения полной относительной длины формирующей полости фильер в диапазоне $l_\Phi/D_\Phi = 6 - 10$ [2], [14]. Из диаграмм также следует, что блокировка фильеры при расчете по уточненной модели происходит при большем значении предельной относительной длины $(l_\Phi/D_\Phi)_{adm}$, показанной для каждой диаграммы штрихпунктирной линией (разница с расчетом по существующей модели 5%).

Определяя давление экструзии через фильеру общей длиной l_Σ , необходимо также учитывать сопротивление ее входной полости с диаметром входного сечения $D_{вх}$ и коэффициентом редукции $k_D = \ln(D/D_\Phi)$, $D_\Phi \leq D \leq D_{вх}$. Для этого целесообразно пользоваться полученной в работах [4], [11] с учетом условия (10) зависимостью (когда $dD/dz \neq 0$), которая в принятых нами обозначениях при $l_\Phi \leq z \leq l_\Sigma$ имеет вид:

$$\sigma_z = -\frac{1}{\beta} \ln \left[\exp(-\beta\sigma_{l_\Phi}) - 4\beta\tau_{s0}\mu(z) \right], \quad (19)$$

где $\mu(z)$ – эквивалентная относительная длина цилиндрического канала, соответствующая осевой протяженности входной полости (находится в зависимости от ее формы и размеров).

При $z = l_\Sigma$ из уравнения (19) находится нормальное осевое напряжение σ_{l_Σ} на входе в фильеру, то есть ее полное сопротивление.

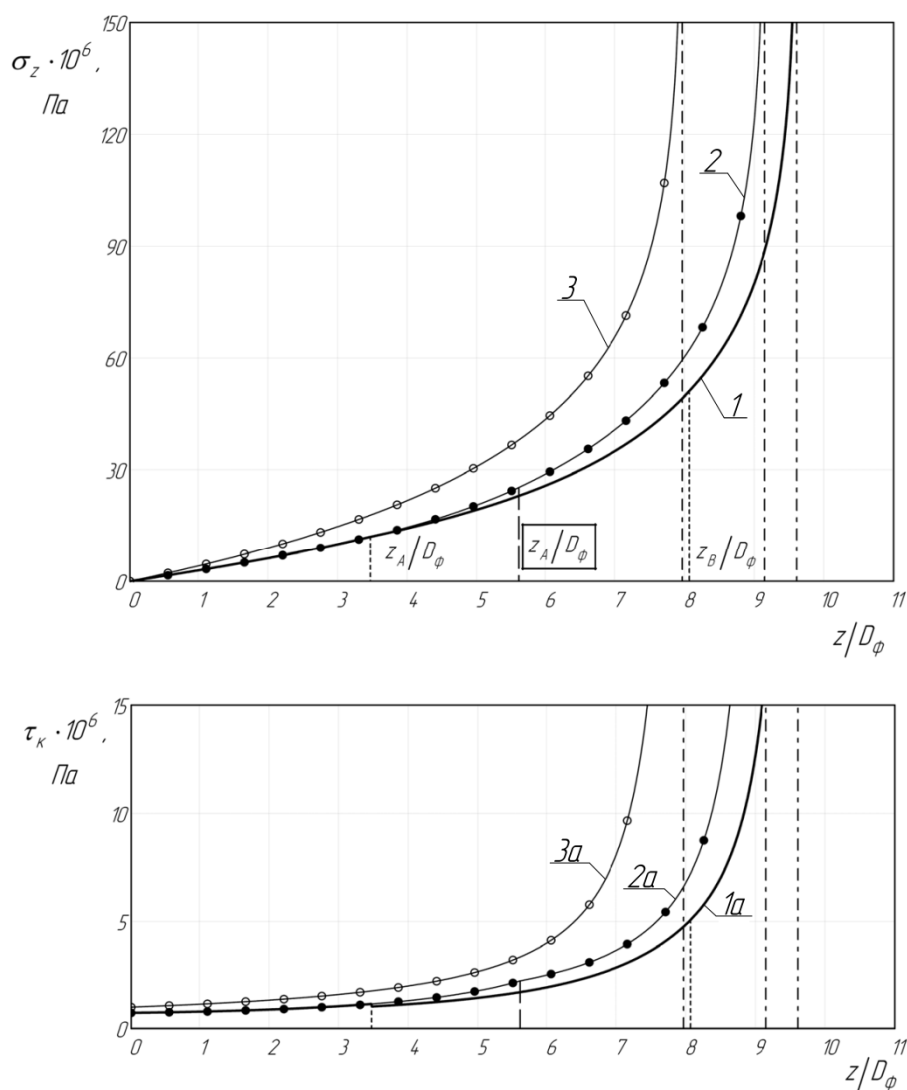


Рисунок 2 – Влияние относительной длины формирующей полости фильеры на ее сопротивление экструзии

Математическая модель напряженного состояния растительного материала в фильере матрицы уточнена, исходя из предположения о наличии на контактной поверхности ее формирующей полости трех участков, на которых реализуются разные условия распределения контактных касательных напряжений и условия пластичности. Полученная модель позволяет более корректно определять сопротивление фильеры, поскольку учитывает погрешность при использовании приближенных условий пластичности. Сравнивая результаты расчетов по уточненной и существующей моделям, отмечаем, что показатель напряженного состояния прессуемого материала на контактной поверхности в каждом поперечном сечении формирующей полости (при $z > z_A$) в первом случае ниже, чем во втором. Это также подтверждается результатами наших экспериментальных исследований, проведенных на специальном приборе в виде модели фильеры, лабораторной установке (на базе пресс-гранулятора ПГМ-05) и промышленном пресс-грануляторе Б6-ДГВ. Следовательно, определяя напряженное состояние материала в фильере по существующей математической модели, при прочих равных условиях получаем завышенные значения давления, необходимого для начала экструзии, что является наиболее возможной причиной факта заниженной производительности и завышенных значений энергосиловых параметров пресс-гранулятора по сравнению с их экспериментальными значениями. Таким образом, уточненная математическая модель движения прессуемого материала в фильере обеспечивает более точное определение критериев оптимизации пресс-гранулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Refinement of solid matters by means of agglomeration by compression with flat die pelleting presses [Электронный ресурс] // AMANDUS KAHN GmbH & Co. KG. – Режим доступа: http://www.akahl.de/akahl/files/Prospekte/Prospekte_englisch/1333-Pressgranu-6e.pdf. Дата обращения: 01.12.2012.
2. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия) / Л.А. Глебов [и др.]. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 816 с.
3. Ковриков, И.Т. Математическое моделирование рабочего процесса в вальцово-матричном пресс-грануляторе с торцевым ограничением клиновидного пространства / И.Т. Ковриков, А.С. Кириленко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 01(75). – С. 132-155. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/42.pdf>. Дата обращения: 01.12.2012.
4. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / под ред. А.Я. Соколова. – М.: Колос, 1984. – 445 с.
5. Ковриков, И.Т. Повышение производительности пресс-грануляторов путем ограничения рабочего пространства дополнительными контактными поверхностями // Известия вузов. Пищевая технология. – 2011. – № 5-6. – С. 78-81.
6. Унсков, Е.П. Инженерная теория пластичности: методы расчета усилий деформирования / Е.П. Унсков. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
7. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Ункова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
8. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
9. Друянов, Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б.А. Друянов. – М.: Машиностроение, 1989. – 168 с.
10. Ишлинский, А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001, 2003. – 704 с.
11. Полищук, В.Ю. Исследование процесса гранулирования комбикормов и путей повышения долговечности рабочих органов прессов-грануляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.14 / В.Ю. Полищук. – М., 1979. – 192 с.
12. Полищук, В.Ю. Проектирование экструдеров для отраслей АПК / В.Ю. Полищук, В.Г. Коротков, Т.М. Зубкова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 204 с.
13. Винников, Г.А. Исследование процесса гранулирования комбикорма в прессах с вращающейся кольцевой матрицей: дис. ... канд. техн. наук / Г.А. Винников. – М., 1970. – 164 с.
14. The Pelleting Process [Электронный ресурс] // California Pellet Mill Co. – Режим доступа: http://www.cpm.net/images/download_files/file1251467542.pdf. Дата обращения: 01.12.2012.

Ковриков Иван Тимофеевич

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств

E-mail: kovrikovit@mail.ru

Кириленко Александр Сергеевич

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Ведущий инженер факультета прикладной биотехнологии и инженерии

Телефон: (3532) 250-444

E-mail: as@askirilenko.ru

I.T. KOVRIKOV, A.S. KIRILENKO

MATHEMATICAL MODEL OF STRESS SYSTEM OF PLANT RAW MATERIALS IN CYLINDRICAL EXTRUSION NOZZLES OF PELLET MILL DIE

In this article, the mathematical model of stress system of elastoplastic plant raw material in its motion in cylindrical extrusion nozzles of pellet mill die is presented. The model is amended with the assumption the contact surface of the extrusion nozzle molding groove has three areas where different conditions of contact shearing stresses distribution and criteria of yielding realize. An analysis of the influence of the extrusion nozzle length ratio on its resistance it is concluded that the developed

mathematical model provides when designing of pellet mills more accurate and correct determination of their optimality criteria as compared with the existing model.

Keywords: pellet mill, mathematical model, die extrusion nozzle, axially symmetrical stress distribution, approximate criterion of yielding, extrusion nozzle length ratio, extrusion nozzle resistance, extrusion pressure.

BIBLIOGRAPHY

1. Refinement of solid matters by means of agglomeration by compression with flat die pelleting presses [Elektronnyj resurs] // AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG. – Rezhim dostupa: http://www.akahl.de/akahl/files/Prospekte/Prospekte_englisch/1333-Pressgranu-6e.pdf. Data obrashhenija: 01.12.2012.
2. Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij otrasli (zernopererabatyvayushhie predpriyatija) / L.A. Glebov [i dr.]. – M.: DeLi print, 2006. – 816 s.
3. Kovrikov, I.T. Matematicheskoe modelirovanie rabocheho processa v val'covo-matrichnom press-granulatore s torcevyim ogranicheniem klinovidnogo prostranstva / I.T. Kovrikov, A.S. Kirilenko // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Elektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 01(75). – S. 132-155. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/42.pdf>. Data obrashhenija: 01.12.2012.
4. Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij po hraneniju i pererabotke zerna / pod red. A.Ja. Sokolova. – M.: Kolos, 1984. – 445 s.
5. Kovrikov, I.T. Povyshenie proizvoditel'nosti press-granuljatorov putem ogranichenija rabocheho prostranstva dopolnitel'nymi kontaktnymi poverhnost'jami // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija. – 2011. – № 5-6. – S. 78-81.
6. Unksov, E.P. Inzhenernaja teorija plastichnosti: metody rascheta usilij deformirovanija / E.P. Unksov. – M.: Mashgiz, 1959. – 328 s.
7. Teorija plasticheskikh deformacij metallov / pod red. E.P. Unksova, A.G. Ovchinnikova. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 598 s.
8. Storozhev, M.V. Teorija obrabotki metallov davleniem / M.V. Storozhev, E.A. Popov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 423 s.
9. Drujanov, B.A. Prikladnaja teorija plastichnosti poristyh tel / B.A. Drujanov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 168 s.
10. Ishlinskij, A.Ju. Matematicheskaja teorija plastichnosti / A.Ju. Ishlinskij, D.D. Ivlev. – M.: FIZMATLIT, 2001, 2003. – 704 s.
11. Polishhuk, V.Ju. Issledovanie processa granulirovanija kombikormov i putej povyshenija dolgovechnosti rabochih organov pressov-granuljatorov: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.14 / V.Ju. Polishhuk. – M., 1979. – 192 s.
12. Polishhuk, V.Ju. Proektirovanie jekstruderov dlja otraslej APK / V.Ju. Polishhuk, V.G. Korotkov, T.M. Zubkova. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2003. – 204 s.
13. Vinnikov, G.A. Issledovanie processa granulirovanija kombikorma v pressah s vrashhajushhejsja kol'cevoj matricej: dis. ... kand. tehn. nauk / G.A. Vinnikov. – M., 1970. – 164 s.
14. The Pelleting Process [Elektronnyj resurs] // California Pellet Mill Co. – Rezhim dostupa: http://www.cpm.net/images/download_files/file1251467542.pdf. Data obrashhenija: 01.12.2012.

Kovrikov Ivan Timofeevich

Dr.Sci.Tech., professor, deserved scientist of the Russian Federation, professor of the chair «Machinery and Equipment of Chemical and Food Industry»
Orenburg State University, Orenburg
E-mail: kovrikovit@mail.ru

Kirilenko Alexander Sergeevich

Principal engineer of the Faculty of Applied Biotechnology and Engineering
Orenburg State University, Orenburg
Phone: (3532) 250-444
E-mail: as@askirilenko.ru

А.А. КОШИН, А.А. ДЬЯКОНОВ

ИМИТАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Приведены результаты кибернетического анализа основных математических моделей процессов механической обработки. Показано, что имитационное моделирование является мощным средством повышения эффективности компьютерных технологий в решении научных задач технологии машиностроения, позволяя при этом решать задачи такого уровня сложности, который недоступен для аналитических моделей.

Ключевые слова: математическое моделирование, технология машиностроения, рекурсия, дискретные модели, стохастические модели.

Традиционное направление в разработке математических моделей объектов и процессов – аналитические модели, т.е. представленные в виде формул. По методологии построения модели подразделяются на:

- эмпирические, базирующиеся на обработке результатов наблюдений;
- гносеологические, базирующиеся на системе основополагающих гипотез о механизме моделируемых процессов.

Созданные тем или иным способом модели служат для прогнозирования поведения процесса в заданных условиях и, в конечном итоге, для разработки модели и алгоритма управления процессом.

При разработке эмпирических моделей вид функциональной зависимости подбирается, исходя из будущего направления ее использования. Поэтому вид их максимально простой, например произведение степенных (силы и стойкость в теории резания) или показательных (долговечность изделий) функций.

Более сложная ситуация наблюдается при разработке гносеологических моделей. Вид формируемой функциональной зависимости в этом случае предопределяется гипотезами, положенными в основу разрабатываемой модели, и соответствующими им фундаментальными законами физических явлений. В итоге сформированная таким образом модель имеет, как правило, интегральное представление с использованием специальных трансцендентных функций. Анализ такой модели, и тем более разработка на ее базе модели и алгоритма управления немислимы без применения компьютерных технологий.

Гносеологические модели позволяют учесть все особенности описываемого процесса, его нелинейности и наличие обратных связей, поэтому они конечно же предпочтительнее. Однако с углублением в механизм описываемого процесса соответственно возрастает и сложность модели. Поэтому актуальна задача более простого и эффективного представления таких сложных и многофакторных моделей.

В силу неизбежности применения компьютерных технологий при работе с созданными моделями целесообразно уже на стадии построения модели учитывать особенности этих технологий.

Основные особенности компьютерных технологий – это пошаговое выполнение любых вычислительных процедур и быстроедействие выполнения каждого шага.

Анализ задач математического моделирования процессов в технологии машиностроения, с позиций указанных особенностей компьютерных технологий, позволил выделить три направления развития моделей, изначально ориентированных на компьютерную реализацию – рекурсивные модели, дискретные алгоритмические модели, стохастические модели.

Рекурсивные модели. Рекурсия – способ задания функции путем определения каждого из ее значений через ранее определенные значения и, возможно, использование других уже определенных функции [1]. Рекурсивное представление функций является теоретиче-

ской базой создания эффективных компьютерных алгоритмов. Например, функция Лапласа (интеграл вероятностей):

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{k!(2k+1)}. \quad (1)$$

имеет следующее представление в виде рекурсии:

$$\begin{cases} y_0 = x, \\ y_k = -x^2 \frac{2k-1}{k(2k+1)} y_{k-1}, \end{cases} \quad (2)$$

на базе которой строится простой и эффективный алгоритм вычисления функции, представленный на рисунке 1.

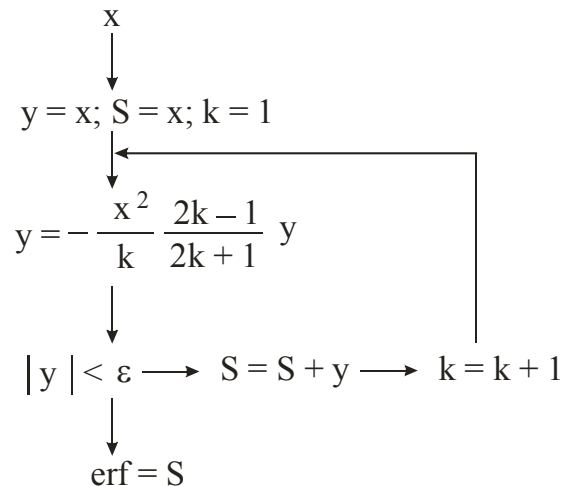


Рисунок 1 – Эффективный алгоритм вычисления функции Лапласа на базе рекурсии

Характерным примером естественной рекурсивности является модель температурного поля заготовки в зоне шлифования, построенная на трактовке процесса шлифования, как процесса множественного микрорезания абразивными зернами, описанной в работе С.Н. Корчака [2]. В этой модели температурное поле, возбуждаемое режущим абразивным зерном, определяется через интегральную функцию первого порядка от функции Лапласа:

$$U = \frac{q\sqrt{\chi t}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\chi t}}\right), \quad (3)$$

где мощность теплового источника q определяется как:

$$q = kV_k \sigma_i. \quad (4)$$

В свою очередь сопротивление обрабатываемого материала разрушению в условиях шлифования – предельное эквивалентное напряжение зависит от степени и скорости деформации, а также от температуры деформируемого материала:

$$\sigma_i = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, U). \quad (5)$$

Концепция теории обрабатываемости материалов в процессах шлифования, предложенной С.Н. Корчаком, состоит в том, что абразивное зерно врезается в металл, нагретый действием предыдущих зерен, и поэтому работа (и мощность тепловыделения) рассматриваемого зерна q зависит от температурно-скоростной прочностной характеристики обрабатываемого материала $\sigma_i = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, U)$. В итоге получаем следующую алгоритмическую процедуру:

– в момент входа абразивного зерна определяется температура обрабатываемого материала, оставшаяся от воздействия предыдущих зерен U_{i-1} ;

– для остаточной температуры, названной в технологической теплофизике температурой самоподогрева, по прочностной температурно-скоростной характеристике обрабатываемого материала (5) определяется предельное эквивалентное напряжение, по которому рассчитывается мощность рассматриваемого источника – зерна (4);

– для найденной мощности источника рассчитывается температурное поле от воздействия рассматриваемого зерна (3).

Эта процедура математически описывается следующей рекурсией:

$$\begin{cases} U_0 = 0, \\ U_i = \frac{kV_k \sigma_{ш}(U_{i-1})}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\chi t}}\right). \end{cases} \quad (6)$$

Еще один пример модели, сводящейся к рекурсии, – основная задача кинематической теории резания. В этой теории упруго-пластическое напряженное состояние обрабатываемого материала и процесс его разрушения формируются при кинематических краевых условиях – заданном движении режущего клина. [3]

При численном решении задачи методом сеток или конечных элементов задается перемещение границы режущей кромки на некоторую величину – шаг. Для заданного перемещения по уравнениям Ламе рассчитываются деформации ε конечных элементов или в узлах сетки. Деформации по закону Гука трансформируются в напряжения σ_j и, в конечном итоге, – эквивалентное напряжение σ , по которому оценивается порог разрушения материала. Для рассчитанного таким образом поля напряжений делается следующий шаг продвижения границы режущей кромки и цикл расчетов повторяется. Математически описанная процедура выражается через следующую рекурсию:

$$\begin{cases} U_0 = 0 & \varepsilon_j^0 = 0 & \sigma_j^0 = 0 \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_j} + \mu \Delta U_j^{i-1} = 0 \\ \varepsilon_i = 3k\sigma_i & \sigma_{x_j}^i = \lambda \varepsilon_i + 2\mu \varepsilon_{x_j}^i & \sigma_i = \frac{1}{3} \sum_j \sigma_{x_j}^i \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, в технологии машиностроения имеется целый класс задач, для которых естественно представление в виде рекурсии, приводящей к наиболее эффективным компьютерным алгоритмам.

Дискретные алгоритмические модели описывают дискретные технологические процессы, относящиеся, в основном, к вопросам организации производства. Наглядным примером технологической задачи, приводящей к дискретной алгоритмической модели, является расчет графика замены режущего инструмента в многоинструментной наладке. В многоинструментной наладке, даже для равной нормативной стойкости для всех инструментов наладки, вследствие разного пути резания у каждого инструмента время работы до затупления будет различным. В работе А.А. Кошина [2] предложен алгоритм наложения времен работы всех инструментов наладки на единую числовую ось и выделения на ней точек, соответствующих выходу из строя каждого инструмента наладки – это и будут моменты времени остановки наладки для замены инструмента. Рассматривая легко вычисляемое множество моментов времени окончания работы каждого j -того инструмента наладки используя математический аппарат теории множеств, можно представить описанный процесс наложения точек на числовую ось в виде следующей циклической процедуры:

$$T_i = \min \left\{ \bigcup_j \{kt^j\}_{n_j} - \{T_k\}_{i-1} \right\} \quad T_0 = 0, \quad (8)$$

где t^j – период стойкости j -того инструмента наладки; T_i – i -ый момент времени остановки наладки на замену инструмента. Первое слагаемое в выражении (8) – это множество точек на оси времени, когда происходит выход из строя каждого из инструментов наладки, с учетом их своевременной замены. Второе слагаемое – это выявленные на предыдущих этапах цикла расчета моменты времени остановки наладки, и поэтому удаленные из рассмотрения на этом этапе.

Таким образом, алгоритмическая модель (8) имитирует временной процесс работы многоинструментной наладки и остановки для замены затупившегося инструмента. К подобным моделям сводится целый класс задач организации взаимодействия оборудования – автоматической или поточной линии, роботизированного участка и т. д.

Стохастические модели. Быстродействие современных компьютеров позволяет по новому ставить задачи моделирования технологических процессов, имеющих вероятностный характер.

Характерным примером такого процесса является шлифование. Как уже указывалось выше, с современных позиций процесс шлифования рассматривается как множественное микрорезание абразивными зернами. В соответствии с технологиями изготовления абразивного инструмента размеры и геометрия зерен шлифовального круга, а также их расположение на поверхности круга являются случайными. Причем можно полагать, что размеры зерен имеют нормальное распределение, а координаты расположения их на поверхности круга – равномерное распределение. Отсюда следует, что процесс формирования температурного поля заготовки в зоне шлифования наложением тепловых импульсов от воздействия режущих абразивных зерен является стохастическим, а функция U , рассчитываемое по рекурсивной процедуре (6), является случайной. Теория случайных функций имеет математические средства для вывода закона распределения функции по заданным распределениям ее параметров. Однако трансцендентный характер функции (3) сильно осложняет задачу, а наличие обратной связи по температурно-скоростной прочностной характеристике (5) делает эти трудности непреодолимыми.

Для компьютерных технологий радикальным упрощением задачи будет стохастическое моделирование процесса формирования случайного температурного поля. Суть стохастического моделирования состоит в том, что температура, рассчитанная по процедуре (6), рассматривается как редукция случайной функции или случайная реализация случайной величины. Тогда, повторяя расчеты для множества допустимых значений случайных параметров процесса, получим выборку значений исследуемой случайной величины, в данном случае – температуры. Обработывая полученную таким образом выборку, получим все интересующие нас характеристики исследуемой случайной функции. Стохастическое моделирование реализуется достаточно простым алгоритмом, представленным на рисунке 2.

Практика стохастического моделирования показала, что для такой устойчивой характеристики температурного поля, как температура самоподогрева, достаточно 50 редукций.

Стохастическое моделирование оказалось единственно возможным методом расчетного определения полей рассеяния размеров, выполняемых в многоинструментной наладке. В соответствии с положениями современной теорией точности многоинструментной много суппортной обработки вектор искажения размера $\overline{g}_i$, формируемого на i -том суппорте, определяется матричным уравнением:

$$\overline{g}_i = e_{0i} \overline{P}_i + e_0 \sum_{k \neq i} \overline{P}_k, \quad (9)$$

где $\overline{P}_i$ – сила резания инструмента, формирующего рассматриваемый размер; $\overline{P}_k$ – силы резания от остальных инструментов наладки; e_0 – матрица податливостей технологической подсистемы «шпиндель – заготовка»; e_{0i} – объединенная матрица податливостей подсистем «шпиндель – заготовка» и « i -ый суппорт с инструментом».

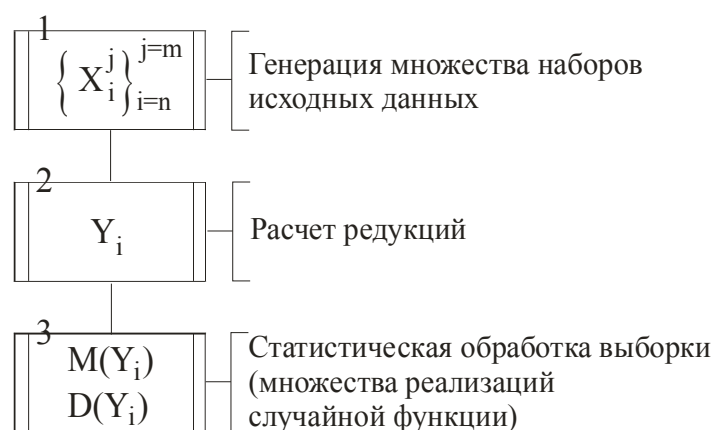


Рисунок 2 – Алгоритм стохастического моделирования случайного температурного поля заготовки в зоне шлифования

Трактуя поле рассеивания выполняемого размера как интервал возможных значений искажений размера $\underline{g}_i$, приходим к задаче определения этого интервала в зависимости от разброса параметров наладки, например, припуска на обработку, твердости заготовок и т. д. Аналитическое определение интервалов рассеивания искажений $\underline{g}_i$ по заданным интервалам варьирования исходных параметров возможно лишь в простейших случаях – для однородных наладок (одинаковые инструменты). В общем случае задача аналитически не решается. Выходом из этой ситуации является стохастическое моделирование. Трактуя решение, полученное по зависимости (9), как редукцию случайной функции, моделируем процесс формирования поля рассеивания при помощи алгоритма, аналогичного изображенному на рисунке 2. Сначала генерируем множества случайных значений факторов, предопределяющих образование поля рассеивания выполняемого размера, затем по зависимости (9) просчитываем необходимое количество редукций случайной функции $\underline{g}_i$, формируя выборку значений исследуемой случайной величины, для которой в итоге проводим требуемую статистическую обработку.

Таким образом, имитационное моделирование является мощным средством повышения эффективности компьютерных технологий в решении научных задач технологии машиностроения, позволяя при этом решать задачи такого уровня сложности, который недоступен для аналитических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катленд, Н. Вычислимость. Введение в теорию рекурсивных функций / Н. Катленд, М.: «Мир», 1983. – 256 с.
2. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
3. Кошин, А.А. Элементы математической теории резания металлов / А.А. Кошин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение», 2003. – №9(25). – С. 102–111.
4. Кошин, А.А. Имитационная стохастическая модель полей рассеивания размеров, выполняемых в многоинструментных многосуппортных наладках / А.А. Кошин, Н.Д. Юсубов // Scientific works. – 2007. – № 1. – С. 32–35.

Дьяконов Александр Анатольевич

ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76

E-mail: sigma-80@mail.ru

A.A. KOSHIN, A.A. DYAKONOV

IMITATING ALGORITHMIC MODELS IN TECHNOLOGY OF MECHANICAL ENGINEERING

Results of the cybernetic analysis of the main mathematical models of processes of machining are given. It is shown that imitating modeling is a powerful tool of increase of efficiency of computer technologies in the solution of scientific problems of technology of mechanical engineering, allowing to solve thus problems of such level of complexity which is inaccessible to analytical models.

Keywords: *mathematical modeling, technology of mechanical engineering, recursion, discrete models, stochastic models.*

BIBLIOGRAPHY

1. Katlend, N. Vychislimost'. Vvedenie v teoriju rekursivnyh funkcij /N. Katlend, M.: «Mir», 1983. – 256 s.
2. Korchak, S.N. Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya / S.N. Korchak. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
3. Koshin, A.A. Jelementy matematicheskoy teorii rezaniya metallov / A.A. Koshin // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie», 2003. – №9(25). – S. 102–111.
4. Koshin, A.A. Imitacionnaya stohasticheskaja model' polej rassejaniya razmerov, vypolnjaemyh v mnogoinstrumentnyh mnogosupportnyh naladkah / A.A. Koshin, N.D. Jusubov // Scientific works. – 2007. – № 1. – S. 32–35.

Dyakonov Alexandr Anatolyevich

FESBEO HPE «South Ural State University» (national research university), Chelyabinsk
The doctoral candidate, Cand.Tech.Sci, the senior lecturer of the department «Mechanical engineering»
454080, Chelyabinsk, Lenin prospect, 76,
Phone: (351) 248-34-14
E-mail: sigma-80@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, **МАТЕРИАЛЫ**

УДК 621.892.097.3: 621.452.3

В.И. БАБКИН, А.А. АЛЕКСАШИН, Л.С. ЯНОВСКИЙ,
С.В. ДУНАЕВ, А.Ф. ХУРУМОВА

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД КАК ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ АВИАЦИОННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

Рассмотрено совершенствование эксплуатационных свойств смазочных масел для авиационных ГТД. Описаны достоинства и недостатки существующих отечественных смазочных масел для авиационных ГТД. Рассмотрены масла для турбореактивных, турбовальных и турбовинтовых авиационных двигателей. Приведено сравнение новых перспективных отечественных масел, разработанных ведущими предприятиями отрасли, с существующими отечественными и зарубежными аналогами.

Ключевые слова: масла для авиационных ГТД, авиационные масла, авиационные газотурбинные двигатели.

Тенденции развития авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), как известно, характеризуются ужесточением условий эксплуатации: большие скорости вращения роторов турбокомпрессора — $12000\text{--}20000\text{ мин}^{-1}$, высокие контактные напряжения на зубьях редукторов и коробки приводов агрегатов (КПА) — до 160 кг/мм^2 , высокие температуры элементов конструкции — $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше [1].

К смазочным маслам для современных авиационных ГТД предъявляются весьма жесткие требования, ввиду необходимо обеспечения надежной эксплуатации на всех режимах работы двигателя в широком диапазоне температур. Масла для авиационных ГТД предназначены для обеспечения как надежного смазывания всех узлов двигателя, так и для охлаждения и отвода абразивных частиц износа узлов трения. Масла должны обладать хорошими вязкостно-температурными свойствами, низкой температурой застывания, высокой термической и термоокислительной стабильностью, высокими температурами вспышки и самовоспламенения, минимальными испаряемостью и вспениваемостью, а также быть инертными к конструкционным материалам [2,3].

Из всех требований к качеству смазочных масел для авиационных ГТД наиболее важным является требование его высокой термостабильности, характеризующей способность масла сохранять на необходимом уровне физико-химические и эксплуатационные свойства при длительной работе в двигателе без образования недопустимого количества отложений продуктов окисления масла на горячих деталях и узлах, омываемых маслом в ходе эксплуатации. Максимальная допустимая температура применения товарных отечественных массовых синтетических масел для авиационных ГТД, не превышает 200°C . Рабочая же температура масла в наиболее теплонпряженных двигателях уже в настоящее время превышает указанный допустимый уровень и составляет $215\text{--}220^{\circ}\text{C}$. В перспективных ГТД рабочие температуры масла будут достигать $240\text{--}250^{\circ}\text{C}$ (рис.1).

Исходя из условий работы двигателей и агрегатов в составе летательных аппаратов [1], масла для авиационных ГТД разделяют на три группы:

- Масла для турбореактивных двигателей (ТРД) — теплонпряженных ГТД;
- Масла и маслосмеси для турбовинтовых двигателей (ТВД), а также других ГТД непрямой реакции;
- Масла для ГТД и редукторов вертолетов — масла этой группы используют в основном в турбовальных двигателях (ТВад) силовых установках вертолетов.

Отметим, что ранее деление масел по типам двигателей считалось условным, существовало мнение, что во всех ГТД удобнее использовать единую марку масла, обладаю-

щую высокими эксплуатационными свойствами. По современным представлениям, решающую роль при определении возможности применения того или иного масла играют условия эксплуатации ГТД, в частности, теплонапряженность и нагрузка на узлы трения, а также температура окружающей среды [1]. В ряду «ТРД→ТВаД→ТВД» теплонапряженность убывает, а нагрузка на узлы трения, наоборот, возрастает, в связи с чем к маслам для ТРД предъявляются повышенные требования по термоокислительной стабильности (ТОС), а к маслам для ТВД – повышенные требования по несущей способности [2,3]. Для обеспечения надёжной смазки шестерен редукторов ТВД требуются масла с большей несущей способностью и, как следствие обладающие большей вязкостью.

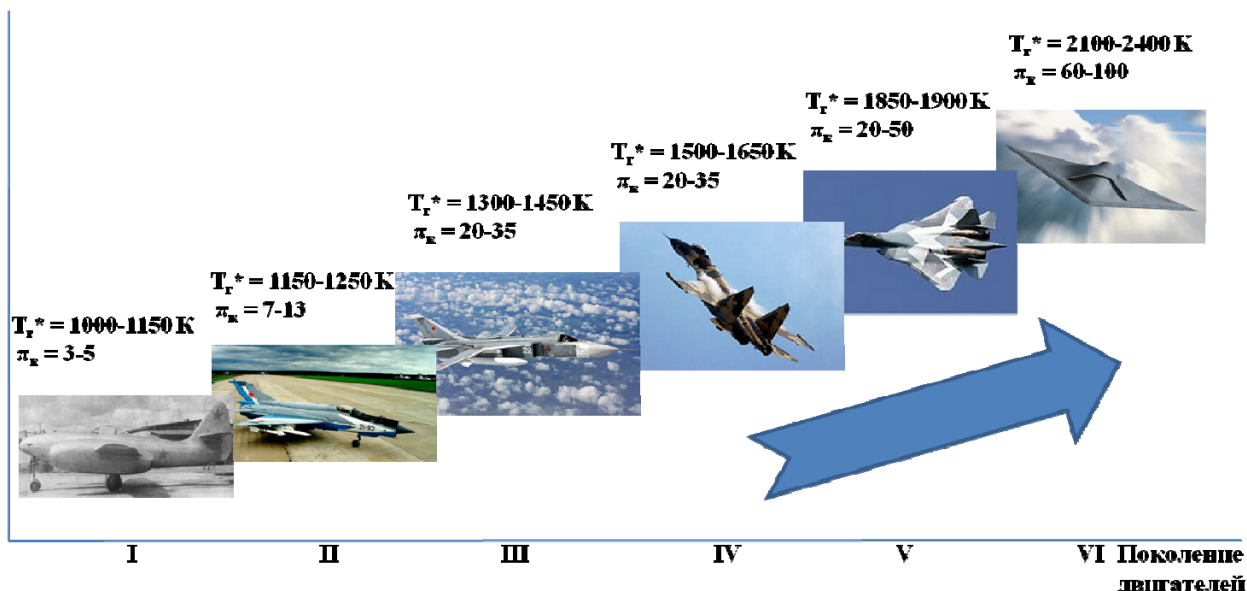


Рисунок 1 – Тенденции развития авиационных ГТД

Разработка и внедрение в эксплуатацию новых смазочных масел для авиационных ГТД, а также совершенствование существующих масел проводились одновременно с развитием отечественного двигателестроения. Основной ассортимент и эволюция по поколениям развития отечественных смазочных масел для ГТД приведены на рисунке 2. Отметим, что в нашей стране используются отечественные авиационные масла лишь II поколения, в то время как за рубежом массовая эксплуатация авиатехники осуществляется на маслах III поколения.

Основным требованием, предъявляемым к первым смазочным маслам для авиационных ГТД, было требование к их температуре застывания для обеспечения работы двигателя при низких температурах окружающей среды. В связи с этим в первых отечественных авиационных ГТД применялись маловязкие минеральные масла, обладающие невысокими эксплуатационными свойствами, предназначенные для других видов техники (типа трансформаторного или веретенного масла).

В 60-70 г.г. XX века были разработаны и допущены к применению минеральные масла селективной очистки МС-6, МС-8, МС-8П и МС-8РК. Масло МС-8П предназначено для применения в авиационных ТРД с температурой масла на выходе из двигателя до 150°C, и широко используется в ТРД старых выпусков гражданской и военной авиации, а также в составе маслосмесей с маслом МС-20 в ТВД типа АИ-20, АИ-24, НК-12МВ(МА). Масло МС-8РК равноценно маслу МС-8П по эксплуатационным показателям и значительно превосходит его по консервационным свойствам.

В связи с ростом теплонапряженности авиационных ГТД уже в начале 60-х годов возникла необходимость применения более термостабильных масел. Из большого класса химических соединений предпочтение было отдано сложным эфирам моноспиртов и двухосновных кислот, а также эфирам многоатомных спиртов и синтетических жирных кислот (СЖК) [4 - 6]. В результате на основе смеси эфиров диэтиленгликоля, пентаэритрита и СЖК фрак-

ции С5-С9 было разработано масло 36/1, содержащее параоксидифениламин в качестве антиокислительной присадки. Позже на основе этого масла был создан ряд масел: 36/1 К, 36/1Ку и 36/1Ку-А. В состав указанных масел для улучшения смазывающей способности вводили противозадирную присадку 2-меркаптобензтиазол («каптакс»). Наличие в маслах присадки «каптакс» обусловило ряд недостатков. Во-первых, в процессе работы двигателя при повышенных температурах «каптакс» окисляется кислородом воздуха, а образующийся при этом 2,2-дитиобисбензтиазол («альтакс»), обладающий низкой растворимостью в масле, при низких температурах выпадает в осадок. Во-вторых, масла с «каптаксом» обладают высокой коррозионной агрессивностью по отношению к цветным металлам и магниевым сплавам. В-третьих, «каптакс» снижает термоокислительную стабильность масел.

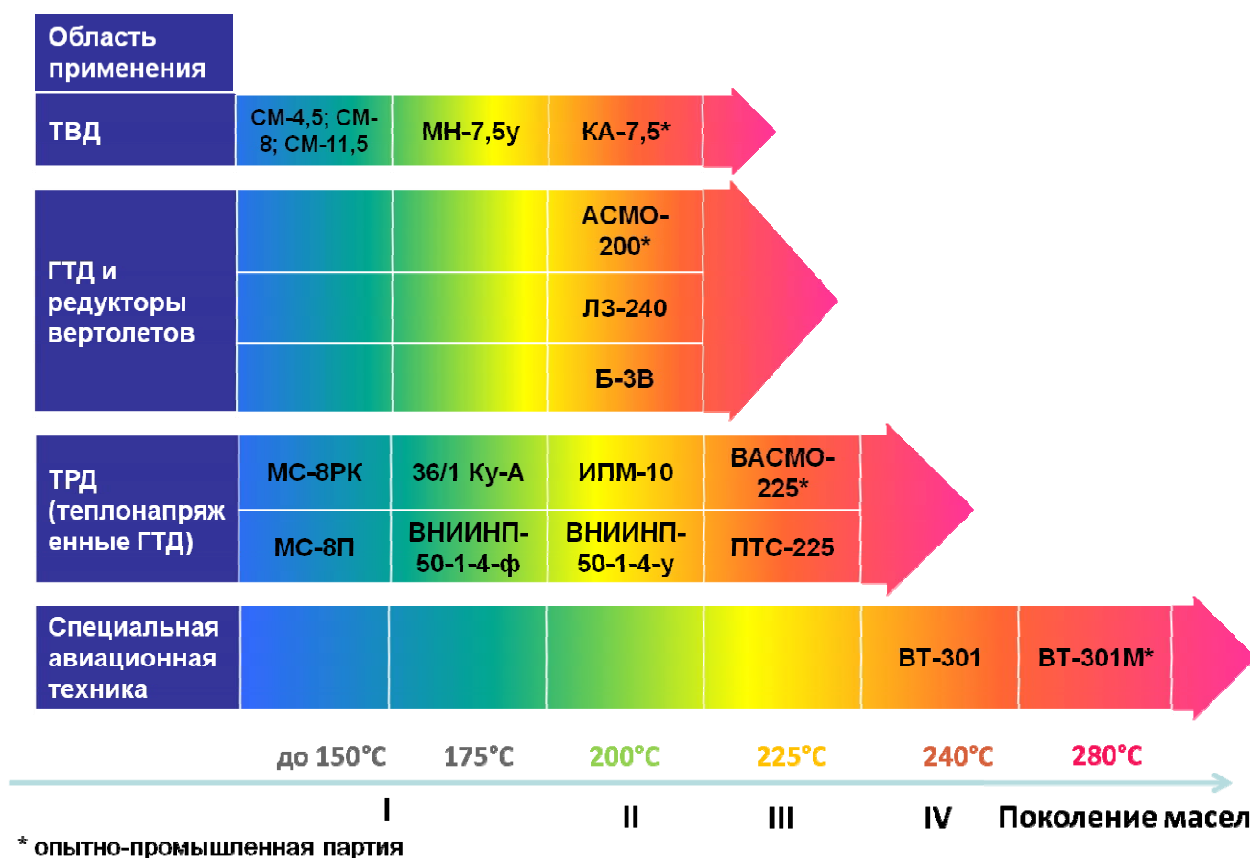


Рисунок 2 - Тенденции развития отечественных смазочных масел для авиационных ГТД

В 60-х годах на основе сложных эфиров диоктилсебагината было разработано и допущено к применению на авиатехнике масло ВНИИНП-50-1-4ф, превосходящее масло 36/1 по эксплуатационным характеристикам. В конце 70-х годов за счет введения в состав ВНИИНП-50-1-4ф модернизированного комплекса присадок были улучшены эксплуатационные свойства этого масла; обновлённой улучшенной композиции была присвоена марка ВНИИНП 50-1-4у. Это масло предназначено для теплонапряженных ТРД и работоспособно при температуре 200 °С (кратковременно при 225 °С). Применению масла ВНИИНП 50-1-4у препятствует дефицит исходного сырья — себациновой кислоты, производимой за рубежом из основ растительного происхождения.

В конце 70-х годов на основе эфиров пентаэритрита и СЖК с использованием комплекса различных присадок с добавлением органосилоксановой жидкости было разработано масло ПТС-225, предназначенное для теплонапряженных ТРД. Масло ПТС-225, прошедшее стендовые и летные испытания в конце 80-х г.г., было допущено к применению в ТРД, оно обладало повышенной термоокислительной стабильностью, высокими смазывающими и вяз-

костно-температурными свойствами, однако, ввиду отсутствия сырья, до сих пор не производится.

С середины 70-х годов масло ИПМ-10 становится основной, наиболее широко применяемой, маркой масел в теплонапряженных ГТД военной и гражданской авиации с максимальной рабочей температурой до 200 °С; также оно было допущено для консервации топливных систем ГТД со сроком хранения до 10 лет. Данное масло обладает низкой коррозионной агрессивностью по отношению к конструкционным материалам, хорошей вязкостно-температурной характеристикой и ТОС. С 1999 г. масло ИПМ-10 вырабатывается на основе поли- α -олефиновых углеводородов (ПАО) зарубежного производства. К недостатку масла ИПМ-10 относят его чувствительность к перегреву в горячих узлах двигателей, вызывающую образование повышенных количеств отложений в маслосистемах изделий.

К смазочным маслам для турбовинтовых двигателей (ТВД) проявляются несколько иные требования, чем к маслам для ТРД. Большая передаваемая мощность авиационных редукторов ТВД в сочетании с их небольшими массой и габаритами приводит к ужесточению условий работы пар трения, росту тепловой и динамической напряженности деталей двигателя. Шестерни редукторов работают в условиях высоких контактных нагрузок, и прочность масляных плёнок маловязких авиационных масел, пригодных для смазки опор ТРД, в данных условиях оказывается недостаточной [2].

Противоречия в требованиях к качеству смазочных масел, которые должны сочетать высокую смазывающую способность с хорошей вязкостно-температурной характеристикой, привели к необходимости применения для смазки ТВД, имеющих общую маслосистему с редуктором винта, смеси из маловязких минеральных масел с высоковязкими остаточными маслами. Маслосмеси долгие годы применялись при эксплуатации ТВД. В настоящее время в ТВД применяют маслосмеси СМ-4,5 (75% МС-8П+25% МС-20), СМ-8 (50% МС-8П+50% МС-20) и СМ-11,5 (25% МС-8П+75% МС-20).

Следует отметить, что маслосмеси в целом обладают невысокими эксплуатационными свойствами. Они не обеспечивают запуск двигателей в зимнее время без подогрева, готовятся на месте без достаточного контроля качества и обладают невысокой термоокислительной стабильностью. При эксплуатации двигателей типа АИ-20 на маслосмеси СМ-4,5 отмечалось образование значительного количества отложений продуктов окисления в маслосистеме; при наработке двигателей более 2000 часов часто происходило коксование отверстий форсуночных колец опоры турбины, что приводило к досрочным съемам двигателей с крыла.

С целью создания единого масла взамен применяемых маслосмесей в середине 60-х годов были разработаны загущенные масла: минеральное масло МН-7,5, содержащее комплекс присадок, и синтетическое масло ВНИИНП-7 на основе загущенного октолом диизооктилсебагината. В качестве основы масла МН-7,5 использовалось масло МС-6. Вязкость масел МН-7,5 и ВНИИНП-7 при 100 °С составляла 7,5 мм²/с. По данным лабораторных исследований, масла МН-7,5 и ВНИИНП-7 существенно превосходили применяемые маслосмеси по основным физико-химическим и эксплуатационным показателям (ТОС, смазывающей способностью, низкотемпературным свойствам). Однако при испытаниях масла МН-7,5 в эксплуатирующих организациях гражданской авиации отмечался значительный рост вязкости масла, особенно в двигателях АИ-24, а также (при эксплуатации двигателей АИ-20 в южных районах) повышенное осадкообразование и, как следствие, появление смолоподобных отложений на фильтрах линии откачки масла из опор турбины и лобового картера.

В 1973 г. были начаты работы по созданию улучшенного масла, обладающего по сравнению с МН-7,5 более высокой ТОС и меньшей испаряемостью. В 1975 г. было разработано усовершенствованное масло МН-7,5у, однако в ходе испытаний и последующей эксплуатации двигателей НК-12МВ с использованием масла МН-7,5у отмечалось существенное снижение его вязкости при работе (до 6,4 мм²/с) вследствие механической деструкции загущающей полимерной присадки. При эксплуатации же двигателей АИ-24 был отмечен, наоборот, существенный рост вязкости масла, приводящий к ухудшению его низкотемпературных свойств. Кроме того, существенным недостатком масла МН-7,5у являлся его повы-

шенный уровень токсичности (3 класс) вследствие использования хлорсодержащей присадки «Совол». К началу 90-х годов производство масла МН-7,5у было прекращено.

Анализ сырьевой и производственной базы России показал, что восстановление масла МН-7,5у старого состава не перспективно. Гражданская авиация имеет большой опыт применения зарубежных масел Turbonucoil 98 (Castrol 98), выпускаемых по спецификации DEF STAN 91-98 (Великобритания) в двигателях непрямой реакции. В связи с этим была поставлена задача разработать новое унифицированное масло взамен МН-7,5у, которое сможет быть использовано как в ТВД, ТВВД самолетов, так и ТВаД и редукторах вертолетов.

Масло КА-7,5 (производства ООО «Квалитет-Авиа») было разработано 2006 г. и в настоящее время проходит контрольно-лётные испытания. В отличие от масла МН-7,5у, в состав нового масла КА-7,5 не входит токсичная присадка «Совол» (3 класс опасности). По ТОС новое масло КА-7,5 превосходит отечественные и некоторые зарубежные аналоги (рис. 3). Токсикологические свойства КА-7,5 по классификации вредных веществ согласно ГОСТ 12.1.007 соответствуют 4-му классу опасности.



Рисунок 3 – сравнение эксплуатационных свойств масла КА-7,5 и отечественных и зарубежных аналогов

Рассмотрим масла для ГТД и редукторов вертолётов.

Силовые установки вертолётов имеют, как правило, две отдельные маслосистемы: для турбокомпрессорной части и для редуктора. Для смазки турбокомпрессорной части могут применяться те же марки масел, что и для смазки ТРД. При этом имеют место все тенденции развития современных турбореактивных двигателей: рост их теплонапряжённости, повышение температуры контактирующих с маслом деталей двигателя и рабочих температур масла, необходимость применения более термостабильных масел [7].

Требования к маслам для редукторов вертолётов примерно те же, что и к маслам для ТВД. Для обеспечения надёжной смазки шестерен редукторов ТВД требуются масла с большей вязкостью и, как следствие, обладающие большей несущей способностью.

Наличие двух отдельных маслосистем предопределило и два различных подхода к обеспечению смазки силовых установок вертолётов, а именно: либо применение различных марок масел для турбокомпрессорной части и редуктора, либо, наоборот, использование единой марки масла.

В двигателях Д-136 вертолёт Ми-26, например, применяют масла ИМП-10 и ВНИ-ИНП 50-1-4ф(у), а в редукторе — масло Б-3В (ЛЗ-240). Двигатели Д-25В вертолётов Ми-6 и Ми-10 эксплуатируются на маловязких маслах типа МС-8П. В редукторах Р-7 этих вертолётов в летнее время применяют маслосмесь СМ-11,5, а в зимнее — СМ-8. При использовании указанных смесей в редукторах вертолётов имеют место те же проблемы, что и при использовании маслосмесей в ТВД.

В силовых установках вертолётов Ми-2 и Ми-8 для смазки двигателя в течение многих лет применяют синтетическое масло Б-3В, созданное на основе сложных эфиров пентаэритрита и синтетических жирных кислот фракции С5-С9 [4,5]. Масло Б-3В содержит в своём составе антиокислительную (параоксидифениламин) и противозадирную (2-

меркаптобензтиазол) присадки, обладает высокой несущей способностью. Существенным недостатком масла Б-3В является склонность к образованию осадков (подобно маслам 36/1 К, 36/1Ку и 36/1Ку-А) вследствие окисления противозадирной присадки, особенно в зимнее время. Это масло термостабильно до 200 °С, однако высокая коррозионная агрессивность его к ряду конструкционных материалов (медные и магниевые и др. сплавы) при повышенных температурах ограничивает температурные пределы его применения. Область применения: ТВД самолетов, ТВАД вертолетов всех типов и редукторы вертолетов типа МИ-8, с рабочей температурой до +200 °С.

Работы по устранению отмеченных недостатков масла Б-3В привели к созданию масла ЛЗ-240 на той же основе, что и Б-3В, обладающее меньшей коррозионной агрессивностью и не содержащее присадки «каптакс». По остальным показателям масла ЛЗ-240 и Б-3В близки. На основании положительных результатов испытаний как в стендовых условиях, так и в эксплуатации масло ЛЗ-240 допущено к применению в изделиях авиатехники наравне с маслом Б-3В.

Для обеспечения современных и перспективных ГТД летательных аппаратов высококачественными отечественными смазочными материалами в НИИСУ совместно с ЦИАМ им. П.И. Баранова и при участии ВНИИНП, 25ГосНИИ Минобороны и ГосНИИГА были разработаны новые высокотермостабильные масла АСМО-200, ВАСМО-225 и ВТ-301М.

АСМО-200 является инновационным отечественным маслом с вязкостью ≈ 5 мм²/с для теплонатяженных авиационных ГТД и редукторов вертолетов, обладающее повышенной несущей способностью. Масло АСМО-200 работоспособно до 200°С и предназначено для авиационных ТВД, ТВАД, ГТД и редукторов вертолётов взамен масла Б-3В. К преимуществам нового масла относится отсутствие выпадения «альтакса», улучшенная ТОС, отсутствие коррозии на меди, низкое осадкообразование, высокие трибологические характеристики (рис. 4).

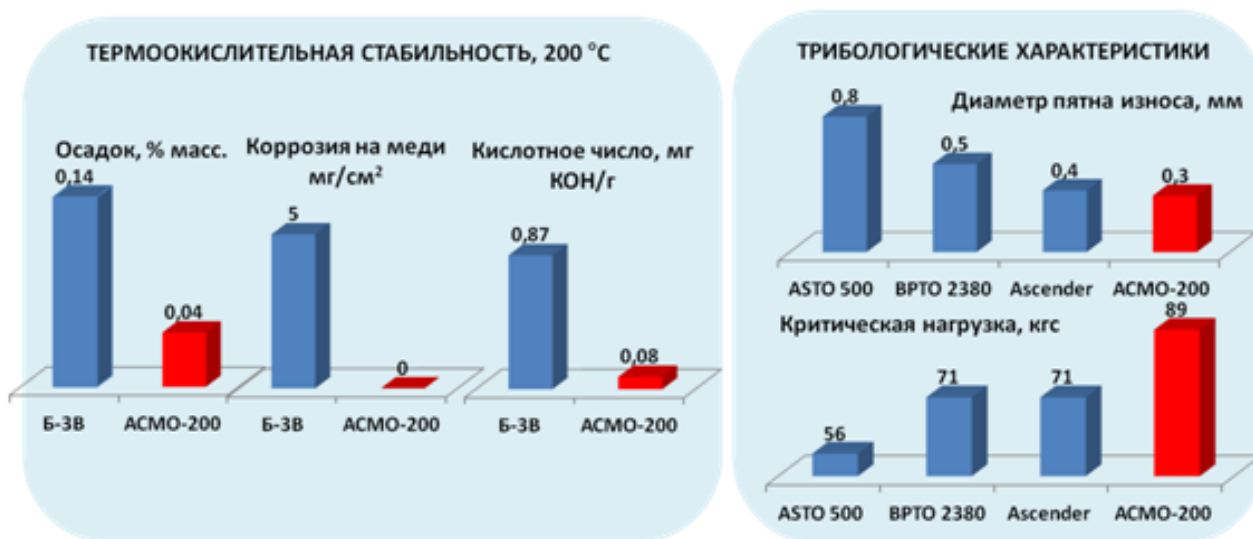


Рисунок 4 – сравнение эксплуатационных свойств АСМО-200 с отечественными и зарубежными маслами – аналогами

Исследования масла АСМО-200 в объеме программы квалификационных испытаний в ЦИАМ им. П.И. Баранова показали, что по трибологическим свойствам (метод ЧШМ по ГОСТ 9490) масло АСМО-200 превосходит зарубежные масла АСТО 500, ВРТО 2380, Ascender и др. (рис. 4). По сравнению с Б-3В масло АСМО-200 имеет преимущество по ТОС (по ГОСТ 23797) при 200°С. Кроме этого, масло АСМО-200 было испытано на соответствие зарубежным спецификациям. По основным показателям это масло удовлетворяет требованиям спецификаций MIL-PRF-23699/F STD и MIL-PRF-23699/F HTS, за исключением требований к ТОС по FED-STD-791-5308. По стойкости к коксообразованию данное масло эквива-

лентно маслам группы STD, но уступает маслам группы HTS, например, маслу Turbonucoil 640 [8].

ВАСМО-225 является инновационным отечественным маслом термостабильным до 225 °С с вязкостью $\approx 4 \text{ мм}^2/\text{с}$, что позволяет ему сочетать хорошие низкотемпературные свойства (как у диэфирных масел с вязкостью $\approx 3 \text{ мм}^2/\text{с}$) с повышенной несущей способностью (как у эфирных масел с вязкостью $\approx 5 \text{ мм}^2/\text{с}$). Новое высокотемпературное масло ВАСМО-225 обладает высокими эксплуатационными свойствами, длительно работоспособно при температурах 220 - 240 °С, превосходит масла-аналоги ИПМ-10 и ПТС-225 по термоокислительной стабильности при 225 °С, а также отечественные и некоторые зарубежные аналоги по трибологическим показателям на ЧШМ по ГОСТ 9490 (рис. 5). Масло ВАСМО-225 отвечает основным требованиям зарубежной спецификации MIL-PRF-7808, за исключением требований ТОС, а также вязкости при низкой температуре. При массовом производстве масло ВАСМО-225, являющееся маслом III поколения, может стать унифицированным для большинства теплонапряжённых ТРД, ТВД, ГТД и редукторов вертолётов.

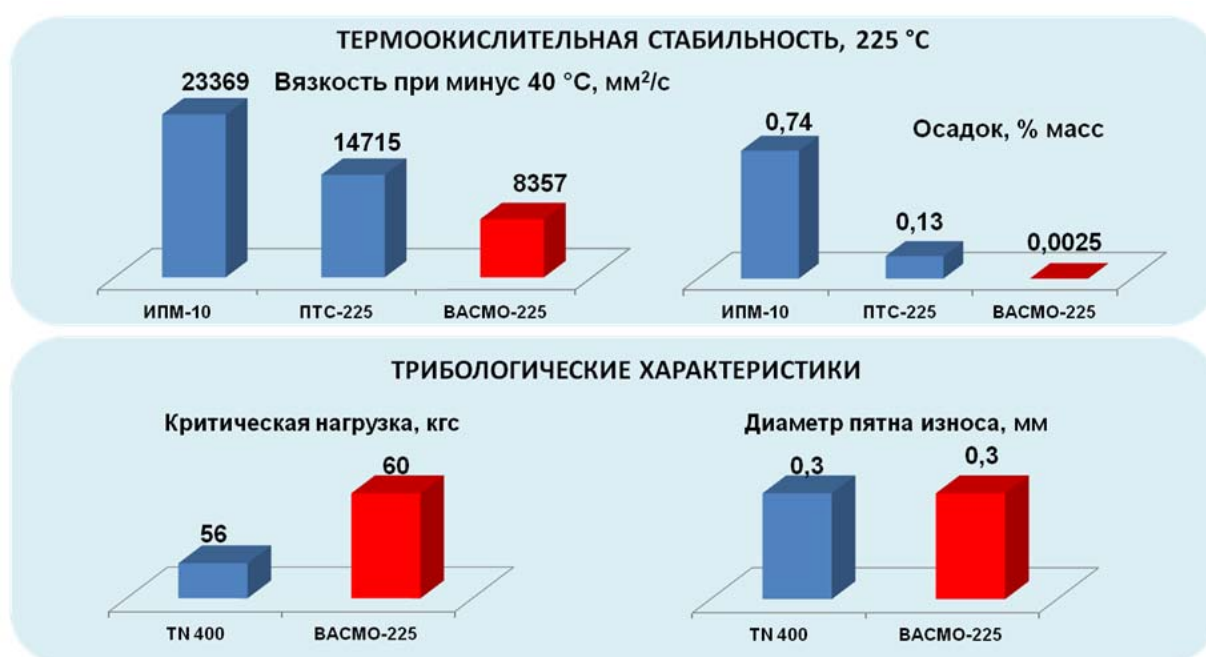


Рисунок 5 – сравнение ВАСМО-225 с отечественными и зарубежными маслами-аналогами

Масло ВТ-301 на основе кремнийорганической жидкости применяется с 80-х гг. для работы в высокотеплонапряженных специальных ТРД с рабочей температурой до 250 °С [9 - 11]. В 2011 г. введение в состав этого масла антиокислительной присадки нового поколения обеспечило повышение максимальной рабочей температуры до 280 °С без снижения других эксплуатационных характеристик. Модернизированное масло получило наименование ВТ-301М и относится к маслам IV поколения.

Внедрение новых синтетических авиационных масел АСМО-200, ВАСМО-225 и ВТ-301М позволит решить проблему обеспечения авиации высококачественными маслами, производимыми на территории Российской Федерации из отечественного сырья по современным технологиям. Кроме этого, появляется возможность устранить имеющую место в России проблему несовместимости смазочных масел одной марки различных производителей, поскольку патентообладателем новых ГСМ является Минпромторг РФ.

За помощь в подготовке статьи авторы выражают благодарность сотрудникам ЦИАМ: Ежову В.М. и Молоканову А.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яновский, Л.С. Инженерные основы авиационной химмотологии / Л.С. Яновский, Н.Ф. Дубовкин, Ф.М. Галимов и др. – Казань: Изд. Казанск. ун-та, 2005. – 714 с.
2. Яновский, Л.С. Методология допуска авиационных масел к применению на авиатехнике в России и за рубежом / Л.С. Яновский, В.М. Ежов, А.А. Молоканов // Двигатель. – №2. – 2012. – С. 20-22.
3. Киришев, Е.Л. Влияние качества горюче-смазочных материалов на работоспособность авиационных газотурбинных двигателей / Е.Л. Киришев, В.Г. Попов, Л.С. Яновский. – М.: МАТИ, 2008. – 102 с.
4. Харт, А.В. Синтетические смазочные материалы и жидкости / А.В. Харт, Р.С. Гундерсон. – Л.: Химия, 1965. – 385 с.
5. Динцес, А.И. Синтетические смазочные масла / А.И. Динцес, А.В. Дружинина. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 350 с.
6. Мамедьяров, М.А. Химия синтетических масел / М.А. Мамедьяров. – Л.: Химия, 1989. – 236 с.
7. Хурумова, А.Ф. Вертолетные масла. Обзорная информация / А.Ф. Хурумова. – М.: ЦНИИТЭнефтехим. – 1992. – №2. – 56 с.
8. Виппер, А.Б. Зарубежные масла и присадки / А.Б. Виппер, А.В. Виленкин, Д.А. Гайснер. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
9. Соболевский, М.В. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов / М.В. Соболевский, О.А. Музовская, Г.С. Попелева. – М.: Химия, 1975. – 279 с.
10. Харитонов, Н.П. Термическая и термоокислительная деструкция полиорганосилоксанов / Н.П. Харитонов, В.В. Островский. – Л.: Наука, 1982. – 208 с.
11. Соболевский, М.В. Органосилоксаны. Свойства, получение, применение / М.В. Соболевский, И.И. Скороходов, К.П. Гриневич. – М.: Химия, 1985. – 264 с.

Бабкин Владимир Иванович

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова, г. Москва
Кандидат технических наук, генеральный директор
E-mail: avim@ciam.ru

Алексашин Анатолий Алексеевич

Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации, г. Москва
Кандидат экономических наук, генеральный директор
E-mail: avim@ciam.ru

Яновский Леонид Самойлович

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова, г. Москва
Доктор технических наук, начальник отдела двигателей и химмотологии
E-mail: yanovskiy@ciam.ru

Дунаев Сергей Васильевич

Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации, г. Москва
К.в.н., начальник отделения смазочных материалов
E-mail: avim@ciam.ru

Хурумова Аида Федоровна

Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации, г. Москва
Кандидат технических наук, начальник отдела ИРЖСМ
E-mail: nio-180@inbox.ru

V.I. BABKIN, A.A. ALEKSASHIN, L.S. JANOVSKY, S.V. DUNAEV, A.F. HURUMOVA

EVOLUTION OF AVIATION LUBRICANTS OILS AS A RESULT OF THE DEVELOPMENT OF GAS TURBINE ENGINES

The article describes the improvement of performance characteristics of lubricating oils for aircraft gas turbine engines. It was found advantages and disadvantages of the existing domestic lubricating oils for aviation gas turbine engines. The article describes oils for turbojet, turboshaft and turboprop aircraft engines. It was carried comparison of new and promising domestic oil, developed by leading companies in the sector, with the existing domestic and foreign counterparts.

Keywords: oils for aviation gas turbine engines, aviation oil, aircraft gas turbine engines

BIBLIOGRAPHY

1. Janovskij, L.S. Inzhenernye osnovy aviacionnoj himmotologii / L.S. Janovskij, N.F. Dubovkin, F.M. Galimov i dr. – Kazan': Izd. Kazansk. un-ta, 2005. – 714 s.
2. Janovskij, L.S. Metodologija dopuska aviacionnyh masel k primeneniju na aviatehnike v Rossii i za rubezhom / L.S. Janovskij, V.M. Ezhov, A.A. Molokanov // Dvigatel'. – №2. – 2012. – S. 20-22.
3. Kirishev, E.L. Vlijanie kachestva gorjuče-smazochnyh materialov na rabotosposobnost' aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej / E.L. Kirishev, V.G. Popov, L.S. Janovskij. – M.: MATI, 2008. – 102 s.
4. Hart, A.V. Sinteticheskie smazochnye materialy i zhidkosti / A.V. Hart, R.S. Gunderson. – L.: Himija, 1965. – 385 s.
5. Dinces, A.I. Sinteticheskie smazochnye masla / A.I. Dinces, A.V. Druzhinina. – M.: Gostoptehizdat, 1958. – 350 s.
6. Mamed'jarov, M.A. Himija sinteticheskikh masel / M.A. Mamed'jarov. – L.: Himija, 1989. – 236 s.
7. Hurumova, A.F. Vertoletnye masla. Obzornaja informacija / A.F. Hurumova. – M.: CNIITJenefte-him. – 1992. – №2. – 56 s.
8. Vipper, A.B. Zarubezhnye masla i prisadki / A.B. Vipper, A.V. Vilenkin, D.A. Gajsner. – M.: Himija, 1981. – 192 s.
9. Sobolevskij, M.V. Svojstva i oblasti primenenija kremnijorganicheskikh produktov / M.V. Sobo-levskij, O.A. Muzovskaja, G.S. Popeleva. – M.: Himija, 1975. – 279 s.
10. Haritonov, N.P. Termicheskaja i termookislitel'naja destrukcija poliorganosiloksanov / N.P. Ha-ritonov, V.V. Ostrovskij. – L.: Nauka, 1982. – 208 s.
11. Sobolevskij, M.V. Organosiloksany. Svojstva, poluchenie, primenenie / M.V. Sobolevskij, I.I. Skorohodov, K.P. Grinevich. – M.: Himija, 1985. – 264 s.

Babkin Vladimir Ivanovich

The central institute of aviation engine building of P.I.Baranov, Moscow
Candidate of Technical Sciences, director general
E-mail: avim@ciam.ru

Aleksashin Anatoly Alekseevich

Standardization and unification research institute, Moscow
Candidate of Economic Sciences, director general
E-mail: avim@ciam.ru

Yanovsky Leonid Samoylovich

The central institute of aviation engine building of P.I.Baranov, Moscow
Doctor of Engineering, head of department of engines and himmotologiya
E-mail: yanovskiy@ciam.ru

Dunaev Sergey Vasilevich

Standardization and unification research institute, Moscow
K.V.N. chief of office of lubricants
E-mail: avim@ciam.ru

Hurumova Aida Fiodorovna

Standardization and unification research institute, Moscow
Candidate of Technical Sciences, head of department of IRZhSM
E-mail: nio-180@inbox.ru

ПОВЫШАЮЩИЙ КОНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАТФОРМЫ

Рассмотрены проблемы реализации повышающего конвертора электропривода вращающейся платформы. Предложено ограничивать ток силовых транзисторов повышающего конвертора путем изменения выходного индуктивного сопротивления. Эффективность устройства ограничения тока проверена на модели, разработанной в среде Matlab/Simulink и на экспериментальном образце повышающего конвертора.

Ключевые слова: электропривод, конвертор постоянного напряжения, математическое моделирование, системы стабилизации.

Электрические системы наведения и стабилизации современных зарубежных танков характеризуются применением звена повышенного (270В) напряжения. Это приводы системы стабилизации фирмы BAE Systems танка Challenger 2 (Великобритания) [1], стабилизатор вооружения танка Leclerc (Франция) фирмы Matra Défense Equipements & Systèmes, опытный образец электромеханических приводов для танка M1A1 (США), разработанный в 2001 г. фирмой Textron [2], стабилизатор вооружения EPS-72 фирмы EADS (Франция-Германия), разработанный для модернизации танков Т-72. Общим в структуре таких систем является наличие повышающего конвертора напряжения бортовой сети (27В). Несмотря на дополнительное преобразование энергии, данное техническое решение повышает КПД привода в целом.

Как правило, такие системы имеют постоянно заряженные накопители, например молекулярно-ионные [3], энергия которых используется при перебросах орудия на большие углы. Вместе с тем, стабилизаторы вооружения характеризуются двумя основными режимами работы – режим стабилизации и режим переброса на большие углы. Требуемые скорости исполнительного двигателя отличаются в этих режимах на порядок. Энергетически выгодно использовать двухступенчатое регулирование выходного напряжения конвертора – в режиме стабилизации пушки повышение напряжения не требуется, при перебросах орудия должен быть обеспечен быстрый заряд конденсатора, установленного на выходе повышающего конвертора. Реализация такого заряда позволяет использовать в качестве накопителя в звене постоянного тока электролитические конденсаторы, имеющие гораздо меньшие габариты.

Для повышающего конвертора, выполненного по двухтактной схеме, задачу оптимизации процесса заряда по критерию быстродействия можно сформулировать в виде поиска максимума среднего зарядного тока I_C при следующем векторе переменных состояния:

$$I_C = \max_{s \in S} I_C(\mathbf{c}, \mathbf{s}), \quad (1)$$

где $\mathbf{c}=[c_1, \dots, c_n]$ – вектор констант-ограничений, компонентами которого являются неизменяемые в процессе оптимизации характеристики, к которым относится, например, величина максимального значения тока $I_{\max}$ через силовой транзисторный ключ;

$\mathbf{s}=[s_1, \dots, s_n]$ – вектор управления, компонентами которого являются характеристики преобразователя, определяемые в процессе разработки.

Запишем вектор управления для данного случая:

$$\mathbf{s}=[L \quad f \quad t_d], \quad (2)$$

где L – индуктивность рассеяния силового трансформатора;

f – частота переключения транзисторов конвертора в режиме токоограничения;

t_d – интервал времени между выключением одного силового ключа и включением другого.

Известные технические решения ограничения тока силовых ключей в случае короткозамкнутой нагрузки (без дросселя в выходной и входной цепях) основаны либо на релейно-

пусковом режиме [4], в котором возможно повторное включение одного и того же ключа, либо на режиме заряда с плавно изменяющейся величиной t_d , задаваемой программно – схема с “плавным пуском” [5]. Отличием предлагаемого технического решения является ограничение зарядного тока путем увеличения выходного индуктивного сопротивления конвертора X_L . Для первой гармоники переменного тока вторичной обмотки можно записать известное соотношение:

$$X_L = 2\pi fL \quad (3)$$

Таким образом, индуктивное сопротивление можно изменять, увеличивая в режиме токоограничения частоту переключения транзисторов конвертора f по сравнению с номинальной. Период переключения при этом является функцией от максимального тока силовых транзисторов $I_{\max}$, величины индуктивности рассеяния и напряжения на конденсаторе нагрузки. Период переключения минимален в начале заряда и увеличивается до номинального при завершении режима токоограничения.

Рассмотрим пример реализации предложенного решения (рис.1).

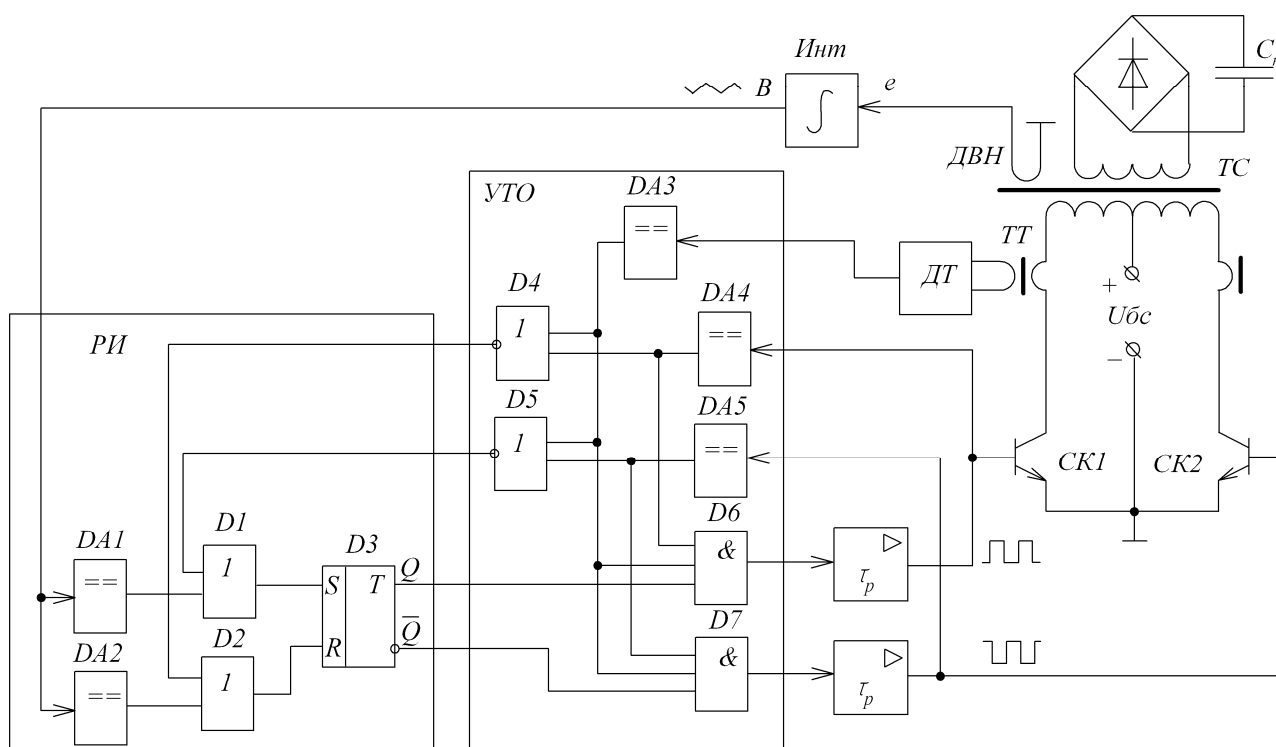


Рисунок 1 – Функциональная схема повышающего конвертора

СК1 и СК2 – силовые ключи, ТС – силовой трансформатор, ТТ – трансформатор тока, ДТ – датчик тока, ПИ – распределитель импульсов, УТО – устройство токоограничения, ДВН – датчик выходного напряжения, Инт – интегратор

До момента перегрузки транзисторы конвертора переключаются на частоте, определяемой автогенераторной обратной связью, образованной датчиком выходного напряжения ДВН, интегратором Инт и компараторами DA1, DA2 (рис.1). Когда ток в ключе, измеренный датчиком тока ДТ, превышает максимальное значение $I_{\max}$, срабатывает компаратор DA3 (напряжение u_1 в момент времени t_1 на рис.2) и, соответственно, устанавливает или сбрасывает триггер D3 в зависимости от того, какой из ключей включен. Если включен СК1, то на выходе компаратора DA4 устанавливается состояние логического "0". При срабатывании компаратора DA3 его выход также устанавливается в состояние логического "0", запирая силовые ключи через элементы D6, D7. Таким образом, на интервале времени t_d выключены

оба ключа. В результате, на выходе логического элемента D4 устанавливается на короткое время состояние логической "1". В то же время на выходе элемента D5 присутствует состояние логического "0" (СК2 выключен). Логическая "1" на выходе D4 однозначно устанавливает на выходе элемента D2 состояние логической "1" и формирует импульс сброса на R-входе триггера D3, в результате действия которого на выходе Q D3 устанавливается состояние логического "0", на выходе $\bar{Q}$ D3 – состояние логической "1", разрешающее включение СК2. В момент времени t_2 на выходе компаратора DA3 устанавливается состояние логической "1" и в соответствии с состоянием триггера D3 включается тот силовой ключ, который в предыдущем такте был выключен. На следующем такте процессы повторяются с тем отличием, что триггер D3 переключается по сигналу компараторов DA3 и DA5. На рис.2 также показано как изменяются токи и напряжения (i_2' , i_3' , u_1') при увеличении t_d ($t_d' \gg t_d$, схема с "плавным пуском").

Особенностью алгоритма является запрет на повторное включение одного и того же ключа. В этом случае ток вторичной обмотки трансформатора i_3 (рис.2) знакопеременный и переходит через 0 в момент выключения одного ключа и включения другого. Такой запрет позволяет избежать одностороннего подмагничивания сердечника трансформатора.

Работа преобразователя в режиме ограничения тока продолжается до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не увеличится до значения U_{C0} , при котором ток ключа не достигнет величины I_{max} на интервале коммутации.

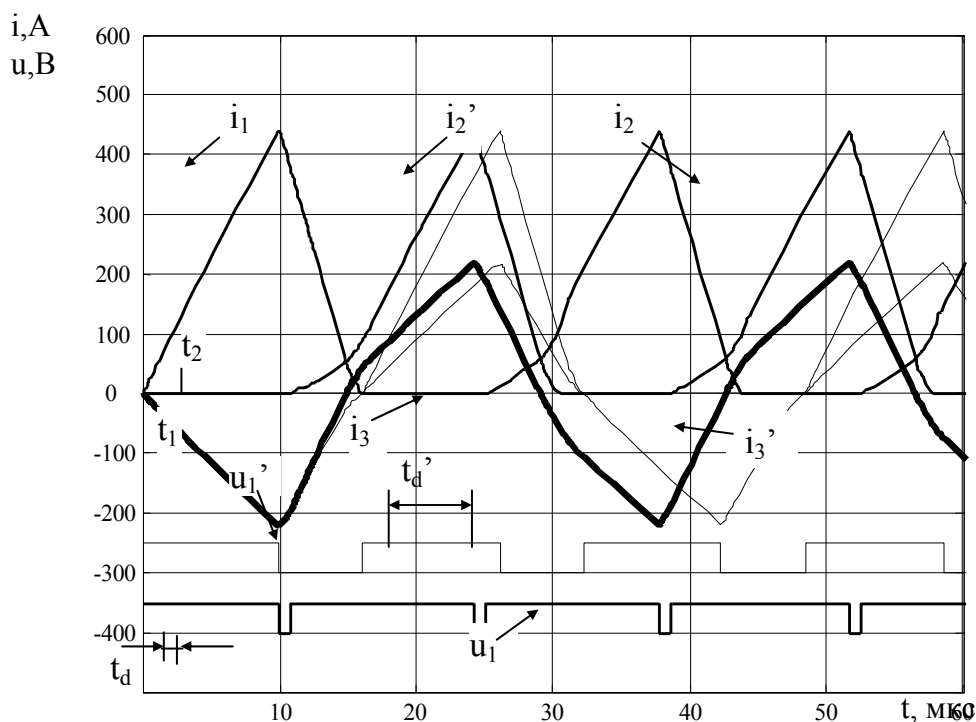


Рисунок 2 – Изменение формы тока конвертора в зависимости от t_d

u_1 – напряжение на выходе компаратора DA3, i_1 и i_2 – токи силовых ключей, i_3 – ток вторичной обмотки, $f_{max}=35.7\text{кГц}$, $f_{max}'=31.2\text{кГц}$.

Путем численного моделирования сравним время заряда в предложенной схеме (величина t_d соответствует осциллограмме u_1 рис. 2) и в схеме с "плавным пуском", в которой коэффициент заполнения увеличивается программно на интервале заряда с 0.4 до 0.8. Результаты численного моделирования конвертора с емкостной нагрузкой величиной 1000 мкФ в среде Matlab представлены на рисунке 3.

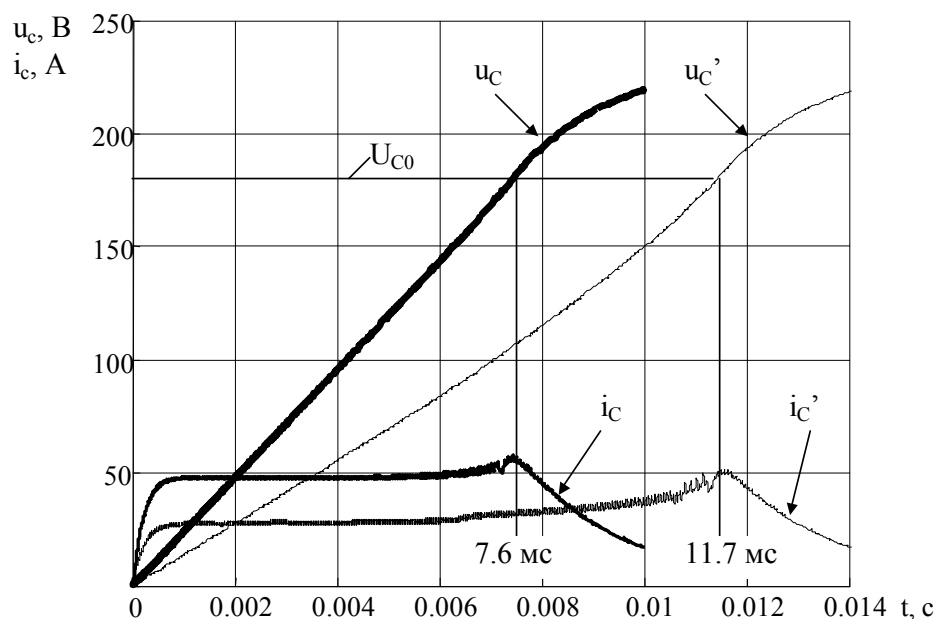


Рисунок 3 – Численное моделирование процесса заряда

i_c – ток заряда, u_c – напряжение на конденсаторе C_n .

Время заряда в схеме с “плавным пуском” (u_c' , i_c' на рис. 3), – 11.7 мс, в схеме с минимальной величиной t_d (u_c , i_c на рис. 3) – 7.6 мс. В схеме с “плавным пуском” ток постепенно увеличивается к концу заряда вследствие увеличения коэффициента заполнения. К этому моменту значение тока нагрузки несколько возрастает в обеих схемах вследствие приближения формы тока силовых ключей к прямоугольной (увеличивается размах петли гистерезиса и уменьшается частота переключения транзисторов).

Результаты экспериментальной проверки предложенной схемы ограничения тока (рис.4,5) на опытном образце повышающего конвертора с $C_n=3760\text{мкФ}$ подтверждают достоверность данных, полученных в результате анализа электромагнитных процессов и численного моделирования. Конструкция опытного образца повышающего конвертора приведена на рисунке 6.

Результаты данного исследования использованы в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых ОАО «ВНИИ «Сигнал», защищены патентом на изобретение [6].

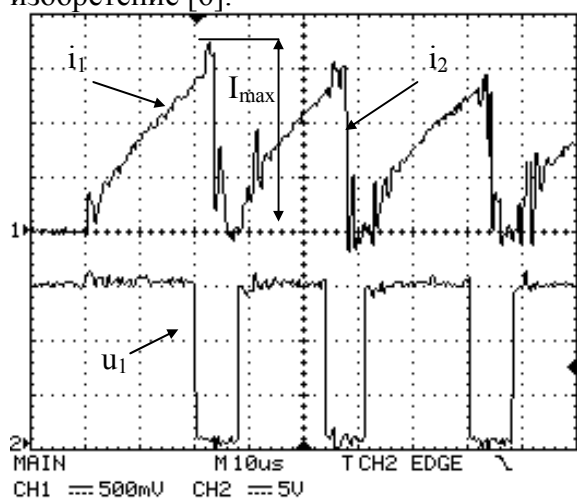


Рисунок 4 – Экспериментальные осциллограммы тока силовых ключей конвертора i_1 , i_2 и выходного напряжения триггера $DA3$ u_1
 $I_{max}=320\text{A}$, $f_{max}=19.2\text{кГц}$.

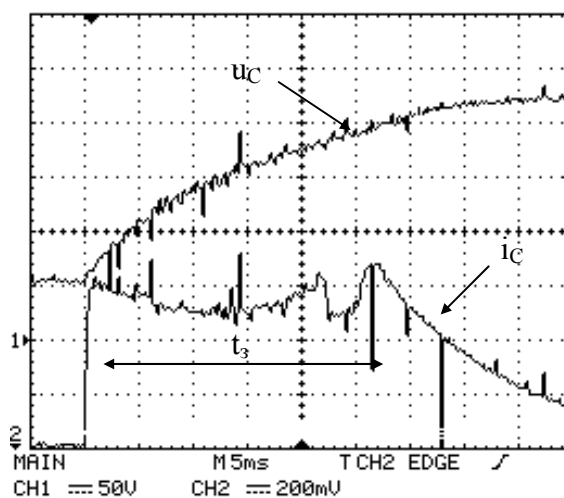


Рисунок 5 – Экспериментальные осциллограммы среднего тока заряда i_c и напряжения на конденсаторе C_n u_c
Время заряда $t_3=26.5\text{мс}$.

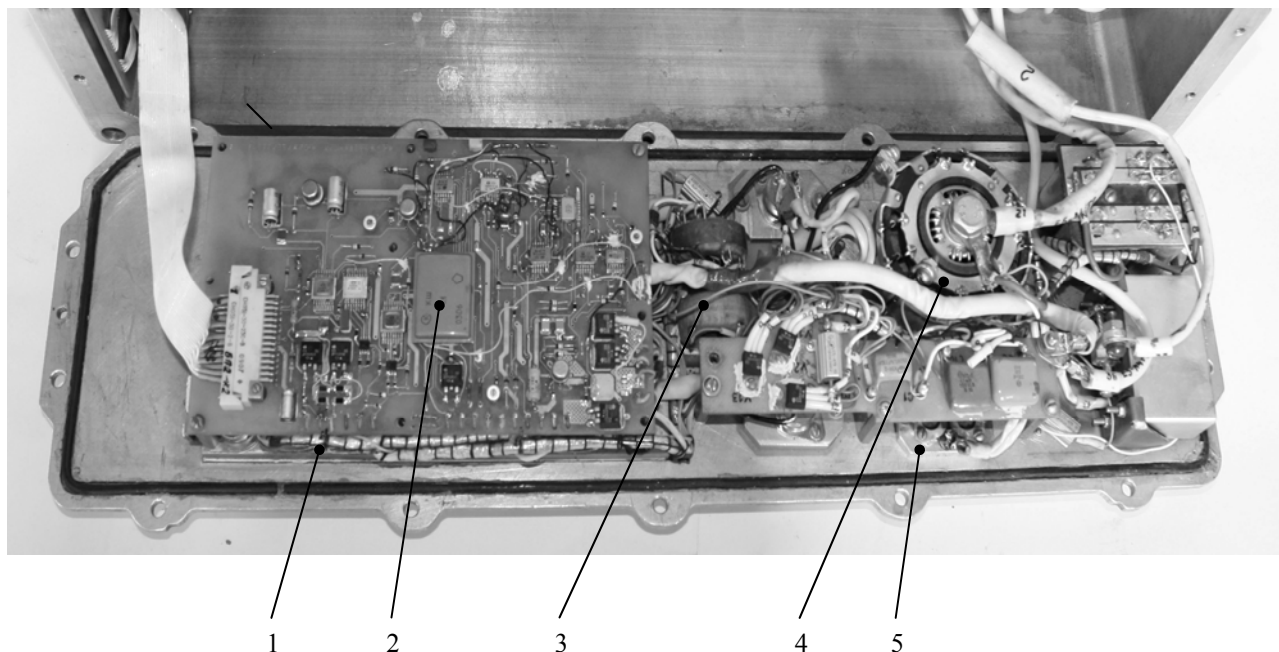


Рисунок 6 – Экспериментальный образец повышающего конвертора с двухступенчатым регулированием выходного напряжения
1 – силовой ключ, 2 – плата управления, 3 – трансформатор тока, 4 – силовой трансформатор, 5 – выходной выпрямитель.

ВЫВОДЫ

Разработанное устройство токоограничения:

1. Обеспечивает оптимальный по быстродействию процесс заряда конденсатора нагрузки повышающего конвертора.
2. Позволяет использовать в звене постоянного тока электролитические конденсаторы малой емкости, имеющие по сравнению с накопителями другого типа гораздо меньшие габариты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jane's Armour And Artillery, 2002.
2. www.systems.textron.com.
3. Встреча с представителями компании «РОСОБОРОНЭКСПОРТ». Материалы презентации ф. EADS. – 2006. – 67 с.д. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986 г. – 376 с.
5. Пат. № 2110133 РФ, 6 Н02 М 3/337. Транзисторный конвертор. Лютый В.Д., Коляго С.Н., Садовов С.Г. – 4898885/09; Заявлено 02.01.91; Оpubл. 27.04.98.
6. Пат. № 2367081 РФ, Н02 М 3/337. Двухтактный транзисторный преобразователь. Елисеев А.Д., Шаталов В.А. – 2008101339/09; Заявлено 09.01.08; Оpubл. 10.09.09. Бюл. № 25.

Елисеев Алексей Дмитриевич

ОАО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров
ведущий инженер-исследователь
телефон: (49232)9-02-53
E-mail: mail@vniisignal.ru

Шаталов Виктор Александрович

ОАО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров
кандидат технических наук, начальник отдела
телефон: (49232)9-02-53
E-mail: mail@vniisignal.ru

A.D. ELISEEV, V.A. SHATALOV

ELECTRICALLY STABILIZED ROTATING PLATFORM STEP-UP CONVERTER

The problems of realization electrically driven rotational platform step-up converter are considered. Converter switching transistors protection by means of output inductive reactance change is proposed. Protection circuitry efficiency is checked on model, which is developed within the Matlab/Simulink environment.

Keywords: electrical drive, DC/DC converter, simulation, stabilization systems.

BIBLIOGRAPHY

1. Jane's Armour And Artillery, 2002.
2. www.systems.textron.com.
3. Vstrecha s predstaviteljami kompanii «ROSOBORONJeKSPORT». Materialy prezentacii f. EADS. – 2006. – 67 s.4. Moin B.C. Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli. – M.: Jenergoatomizdat, 1986 g. – 376 s.
5. Pat. № 2110133 RF, 6 H02 M 3/337. Tranzistornyj konvertor. Ljutyj V.D., Koljago S.N., Sodomov S.G. – 4898885/09; Zajavleno 02.01.91; Opubl. 27.04.98.
6. Pat. № 2367081 RF, H02 M 3/337. Dvuhtaktnyj tranzistornyj preobrazovatel'. Eliseev A.D., Sha-talov V.A. – 2008101339/09; Zajavleno 09.01.08; Opubl. 10.09.09. Bjul. № 25.

Yeliseyev Alexey Dmitriyevich

JSC All-union Scientific Research Institute Signal, Kovrov
leading research engineer
phone: (49232) 9-02-53
E-mail: mail@vniisignal.ru

Shatalov Victor Aleksandrovich

JSC All-union Scientific Research Institute Signal, Kovrov
Candidate of Technical Sciences, head of department
phone: (49232) 9-02-53
E-mail: mail@vniisignal.ru

А.М. МАНДЕЛЬ, А.И. ЛОСКУТОВ, В.Б. ОШУРКО, Г.И. СОЛОМАХО

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПО ВОЛЬТАМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТУННЕЛЬНОГО ТОКА

Измерения методами зондовой микроскопии показывают, что локальная фрактальная размерность некоторых нанопокровов колеблется примерно от 2,7 до 3,0. В средах с такой размерностью в приближении короткодействующего потенциала рассмотрено поведение связанного поверхностного заряда во внешнем электрическом поле. Установлено, как эффективная фрактальная размерность влияет на сдвиг энергии связи и вероятность автоионизации. Таким образом, появляется возможность экспериментального определения локальной размерности среды в окрестности поверхностного заряда по обычной вольтамперной характеристике туннельного тока.

Ключевые слова: фрактальная размерность, нанопокров, связанный поверхностный заряд, туннельный ток, вольтамперная характеристика.

В последнее время все больше внимания привлекают уникальные трибологические свойства нанопокровов с так называемыми фуллереноподобными (IF) включениями типа MoSe_2 или WSe_2 (например, [1-3]). В частности, нами методами зондовой микроскопии были исследованы описанные в [3] лазерно-напыленные нанопокровы из алмазоподобного углерода $a\text{-C}$ на подложке из стали с такими включениями. Они имеют в целом аномально низкий коэффициент трения (от 0,01 до 0,07) и значения фрактальной размерности, изменяющиеся от участка к участку в диапазоне примерно от 2,7 до 3,0. На рисунке 1 представлена фотография поверхности с подобным нанопокровом. Безусловно, связность поверхностных частиц и образуемых ими кластерных структур, определяемая фрактальной размерностью, влияет на прочность и износостойкость такого нанопокрова.

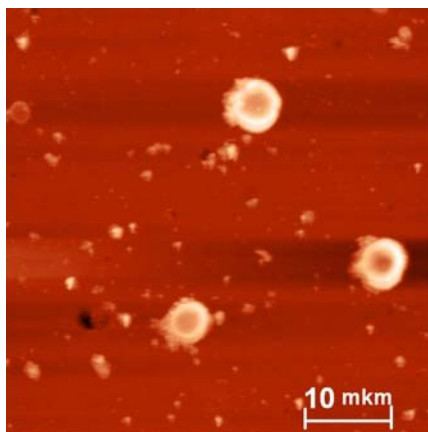


Рисунок 1 – Микрофотография поверхности стального образца с лазерно-напыленным нанопокровом из алмазоподобного углерода $a\text{-C}$ со сфероидными включениями диселенида молибдена. Светлыми кольцами выделяются наиболее крупные зерна MoSe_2 , принимающие на себя основную нагрузку в интерфейсе трения

В настоящее время фрактальная размерность (S_{fd}) входит в стандартный набор параметров, определяемых методами зондовой микроскопии путем обработкой профиля поверхности [4]. При этом ее величина зависит, и иногда существенно, от принятого алгоритма обработки. В нашей работе [5] показано, что существует принципиальная возможность независимого определения фрактальной размерности пространства, окружающего поверхностный валентный электрон, - по сдвигу его энергии связи в магнитном поле. По сути, вопрос стоит гораздо шире: как поверхностный заряд «чувствует» локальную структуру окружающего его пространства.

Настоящая работа посвящена решению аналогичной задачи, но во внешнем электрическом поле. Оно предпочтительнее магнитного в том смысле, что используется в туннельном микроскопе для снятия стандартной вольтамперной характеристики туннельного тока. Аналогично [5], воспользуемся для описания связанного поверхностного электрона известным приближением δ -потенциала [6], но в пространстве произвольной действительной размерности n . Такой достаточно простой метод вполне адекватен для учета действия внешнего поля в твердом теле. Причина в том, что волновая функция электрона факторизуется на сомножители, зависящие от самосогласованного потенциала в твердом теле, и сомножители, зависящие только от внешнего поля [7-9]. Важно, что в пространстве дробной размерности проблематично явно ввести какую-либо координату, кроме радиальной. Это значительно усложняет явное представление уравнения Шредингера в такой среде. Замечательно, что метод δ -потенциала этого и не требует, «автоматически отсекая» все сферически несимметричные вклады. По-сути, именно благодаря этому фактору становится возможным достаточно простое обобщение метода на пространства нецелой размерности (моделируемые размерностью δ -ямы). Разумеется, таким образом можно описать только связанные s -состояния поверхностных электронов.

Поскольку локальная фрактальная размерность поверхности различна на разных ее участках, а линейный размер области, на которой формируется эта величина, примерно на порядок-два превышает размер электронного облака (в большинстве простых полупроводников это ~ 1 нм), n в уравнении Шредингера становится случайной функцией координат. Возможно, хотя и в меньшей степени, это относится и к эффективной массе поверхностного электрона m и к невозмущенной энергии связи поверхностного электрона в отсутствие внешнего поля $W_0 < 0$.

Везде в дальнейшем будем использовать известную атомную систему единиц [10]. Расстояние r определяем в единицах длины рассеивания $\hbar / \sqrt{2m |W_0|}$, время τ – в единицах $\hbar / |W_0|$, а энергию w – в единицах $|W_0|$. Граничное условие в точке сосредоточения связывающего δ -потенциала в пространстве произвольной размерности n имеет вид [5]

$$\begin{aligned}\psi(r)_{r \rightarrow 0}^{(n)} &\approx A \left[r^{2-n} + 2^{2-n} \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \Gamma^{-1}\left(\frac{n}{2} - 1\right) \right], n \neq 2 \\ \Psi(r)_{r \rightarrow 0}^2 &\approx A [\ln(r) - \ln 2 + \gamma], n = 2\end{aligned}\quad (1)$$

Напряженность электрического поля будем определять в единицах $\sqrt{2m|W_0|^3} / e\hbar$ – поля, совершающего работу $|W_0|$ на дебройлевской длине. Безразмерную напряженность в таких единицах обозначим как ε . Для введения внешнего электрического поля в асимптотику функции Грина в нуле достаточно записать ее в интегральном представлении Зоммерфельда, отбрасывая сферически несимметричные члены, и ввести в экспоненту хорошо известное слагаемое $-i\varepsilon^2 \tau^3 / 12$

$$\psi(r)_{r \rightarrow 0}^{(n)} \approx A \int_0^\infty \frac{d\tau}{\tau^{n/2}} \exp \left[(-i) \left(\frac{r^2}{4\tau} + w\tau + \frac{1}{12} \varepsilon^2 \tau^3 \right) \right]$$

где r – радиальная координата,

A – несущественная в методе нормировочная постоянная.

Далее, следуя логике метода, необходимо выделить в полученном интеграле бесполевую функцию Грина и потребовать независимости асимптотики (1) от напряженности внешнего поля. В результате получаем трансцендентное интегральное уравнение для комплексной

функции $w(\varepsilon)$ – разности безразмерной энергии вакуума и связанного уровня от напряженности электрического поля

$$\int_0^{\infty} \frac{d\tau}{\tau^{n/2}} \exp(-i\tau) \left\{ \exp \left[(-i) \left(\frac{\varepsilon^2 \tau^3}{12} + (w-1)\tau \right) \right] - 1 \right\} = 0 \quad (2)$$

Легко убедиться, что в обычном случае $n=3$ полученное уравнение сводится к известным билинейным комбинациям функций Эйри [10]. В дальнейшем мы ограничимся случаем $n < 4$, тогда интеграл в (2) хорошо определен в нуле.

Определенную (и довольно давнюю) проблему составляет расходимость этого интеграла при появлении в $w(\varepsilon)$ мнимой части, связанной с вероятностью автоионизации [6], [10]; именно она делает связанный уровень квазистационарным. Теория таких состояний еще далека от завершения даже в обычных «целочисленных» пространствах, и расходимость нормировочного интеграла для волновой функции – одно из проявлений этой незавершенности. Однако, к счастью, в асимптотике слабых полей этот фактор не проявляется. Дело в том, что при малых ε действительную часть $w(\varepsilon)$ определяет только окрестность нулевой точки в интеграле (2), а мнимую часть – только окрестность точки стационарной фазы [11]. После такой асимптотической оценки интеграла (2) получаем, решив уравнение, для безразмерной энергии связи следующую асимптотическую оценку

$$w(\varepsilon)_{\varepsilon \ll 1} \approx 1 + \frac{(6-n)(4-n)}{48} \varepsilon^2 + \frac{i\pi^{1/2} \varepsilon^{(n-1)/2}}{2^{(n+1)/2} \Gamma(2-n/2)} \exp\left(-\frac{4}{3\varepsilon}\right) \quad (3)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма-функция.

Полученные выражения обобщают хорошо известные формулы Демкова и Друкарева для сдвига (действительной части) и уширения (мнимой части) связанного уровня в δ -яме [6] на пространства произвольной размерности. Легко видеть, что при $n=3$ соотношение (3)

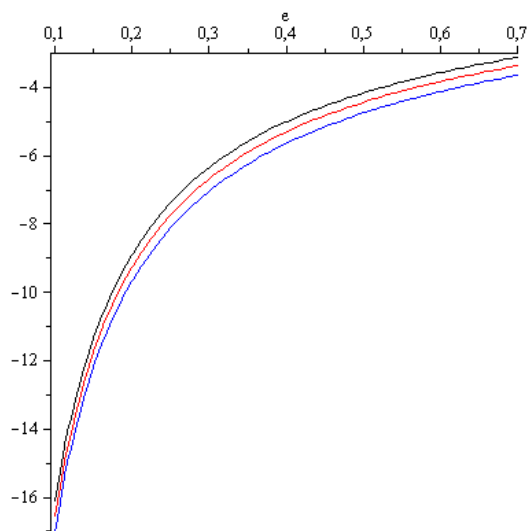


Рисунок 2 – Зависимость натурального логарифма вероятности автоионизации (мнимой части комплексной энергии связанного уровня (3)) $\ln[\text{Im } w(\varepsilon)]$ от безразмерной напряженности электрического поля ε при различных значениях фрактальной размерности. Последовательно сверху вниз $n = 2,6; 2,8; 3,0$

их воспроизводит. Видим также, что от размерности среды зависит как действительный (квадратичный по полю) сдвиг уровня, так и предэкспоненциальный фактор в его ширине. Ионизация уровня в слабом поле происходит за счет туннельного эффекта, в котором экспоненциальный фактор определяется кратчайшей подбарьерной траекторией электрона. Именно поэтому показатель экспоненты в (3) «не чувствует» размерность среды.

Главное же практическое следствие полученной формулы состоит в том, что обычный туннельный ток, измеряемый туннельным микроскопом, должен быть пропорционален вероятности распада связанного уровня, т.е. мнимой части (3). График зависимости этой величины в логарифмическом масштабе от безразмерной напряженности электрического поля при различных значениях фрактальной размерности представлен на рисунке 2. Разумеется, формула (3) относится к не слишком сильным (по сравнению с внутриатомным) электрическим полям. Для полей произвольной напряженности необходимо численно решать бо-

лее общее комплексное интегральное уравнение (2). Следовательно, сопоставляя экспериментальную вольтамперную характеристику, снятую в данной точке, с зависимостью (3), теоретически возможно определить эффективную фрактальную размерность поверхности в окрестности данной точки.

Работа была поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования по приоритетным направлениям научно-технического развития РФ 2007-2013 гг.", контракт номер 16.552.11.7052.

Благодарность. Авторы признательны Вячеславу Юрьевичу Фоминскому за предоставленные в наше распоряжение уникальные образцы лазерно-напыленных нанопокровов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greenberg R., Halperin G., Etsion I., Tenne R. // Tribology Letters, 2004, Vol. 17, No 2, p. 179-186.
2. Perfiliev V., Moshkovich A., Verdyan A., Tenne R. and Rapoport L. // Tribology Letters, 2006, Vol. 21, No 2, p. 89-93.
3. Неволин В.Н., Фоминский В.Ю., Гнедовец А.Г., Романов Р.И. // Физика и химия обработки материалов, 2009, №4, с. 39-47.
4. Bharat Bhushan. Nanotribology and Nanomechanics. An introduction. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 1529p.
5. Григорьев С.Н., Мандель А.М., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И. // Письма в ЖТФ, 2011, т. 37, в. 24, с. 74-80.
6. Демков Ю.Н., Островский В.Н. Метод потенциала нулевого радиуса в атомной физике. Л.: ЛГУ, 1975. 348с.
7. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978. 616с.
8. Шабад А.Е. Поляризационные эффекты во внешних калибровочных полях. Труды ФИАН, 1988, т.192.
9. Родионов В.Н., Кравцова Г.А., Мандель А.М. // Письма в ЖЭТФ, 2003, т.78, в.4, с. 253-257.
10. Manakov N.L., Frolov M.V., Starace A.F., Fabricant I.I. // J.Phys.B., 2000, Vol.33, P.R141.
11. Родионов В.Н., Кравцова Г.А., Мандель А.М. // ТМФ, 2005, т.145, №2, с.198-211.

Мандель Аркадий Михайлович

Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», г. Москва

Кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Физика»

E-mail: arkadimandel@mail.ru

Лоскутов Александр Иванович

Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», г. Москва

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика»

E-mail: ailoskutov@yandex.ru

Ошурко Вадим Борисович

Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», г. Москва

Доктор физико-математических наук, Заведующий кафедрой «Физика»

E-mail: vbo08@yandex.ru

Соломахо Георгий Игнатьевич

Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», г. Москва

Кандидат физико-математических наук,

Профессор кафедры «Физика»

E-mail: solgeo@mail.ru

A.M. MANDEL, A.I. LOSKUTOV, V.B. OSHURKO, G.I. SOLOMAKHO

TO THE POSSIBILITY OF DETERMINATION OF THE SURFACE LOCAL FRACTAL DIMENSION BY CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE TUNNELING CURRENT

Local fractal dimensionality of some nanocoverings measured by probe microscopy changes approximately from 2.7 to 3.0. The behavior of bound surface charge in external electric field in the environment with such dimension in approximation of short-range potential has been considered. The affect of effective fractal dimension on the binding energy shift and probability of autoionization has been established. Thus, local fractal dimension of the environment near the bound surface charge could be experimentally determinated by usual current-voltage characteristic of tunneling current.

Keywords: fractal dimension, nanocovering, bound surface charge, tunneling current, current-voltage characteristic.

BIBLIOGRAPHY

1. Greenberg R., Halperin G., Etsion I., Tenne R. // Tribology Letters, 2004, Vol. 17, No 2, p. 179-186.
2. Perfiliev V., Moshkovich A., Verdyan A., Tenne R. and Rapoport L. // Tribology Letters, 2006, Vol. 21, No 2, p. 89-93.
3. Nevolin V.N., Fominskij V.Ju., Gnedovec A.G, Romanov R.I. // Fizika i himija obrabotki materialov, 2009, №4, s. 39-47.
4. Bharat Bhushan. Nanotribology and Nanomechanics. An introductions. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 1529p.
5. Grigor'ev S.N., Mandel' A.M., Oshurko V.B., Solomaho G.I. // Pis'ma v ZhTF, 2011, t. 37, v. 24, s. 74-80.
6. Demkov Ju.N., Ostrovskij V.N. Metod potencijala nulevogo radiusa v atomnoj fizike. L.: LGU, 1975. 348s.
7. Ansel'm A.I. Vvedenie v teoriju poluprovodnikov. M.: Nauka, 1978. 616s.
8. Shabad A.E. Poljarizacionnye jeffekty vo vneshnih kalibrovocznyh poljah. Trudy FIANa, 1988, t.192.
9. Rodionov V.N., Kravcova G.A., Mandel' A.M. // Pis'ma v ZhJeTF, 2003, t.78, v.4, s. 253-257.
10. Manakov N.L., Frolov M.V., Starace A.F., Fabricant I.I. // J.Phys.B., 2000, Vol.33, P.R141.
11. Rodionov V.N., Kravcova G.A., Mandel' A.M. // TMF, 2005, t.145, №2, s.198-211.

Mandel Arcady Mikhaylovich

Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow

Candidate of physical and mathematical sciences, professor of Fizika chair

E-mail: arkadimandel@mail.ru

Loskutov Alexander Ivanovich

Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow

Candidate of Chemistry, associate professor of "Physicist"

E-mail: ailoskutov@yandex.ru

Oshurko Vadim Borisovich

Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow

Doctor of physical and mathematical sciences, Head of the department of "Physicist"

E-mail: vbo08@yandex.ru

Solomakho George Ignatyevich

Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow

Candidate of physical and mathematical sciences,

Professor of Fizika chair

E-mail: solgeo@mail.ru

В.А. ЛАШКО, Д.В. ТИМОШЕНКО

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ С ГАЗОТУРБИННЫМ НАДДУВОМ

В статье рассматриваются основные подходы и уравнения, используемые в математической модели переходных режимов дизельного двигателя с газотурбинным наддувом. Проверена адекватность рассматриваемой модели. Приведены основные результаты расчетных исследований.

Ключевые слова: математическая модель, переходный процесс, дизельный двигатель, газотурбинный наддув, турбокомпрессор, радиальная центробежная турбина, центробежный компрессор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным средством повышения мощности и экономичности ДВС является газотурбинный наддув. При использовании наддува возникает целый комплекс специфических проблем, одной из которых является ухудшение динамики, топливной экономичности, экологических показателей двигателя на неустановившихся и переходных режимах работы. Ситуация усугубляется с ростом степени форсирования.

Основные усилия при решении данной проблемы направляют на совершенствование системы автоматического регулирования частоты вращения и снижение момента инерции ротора турбокомпрессора, поршневому двигателю и собственно системе газотурбинного наддува уделяется существенно меньшее внимание. В результате значительные резервы повышения качества переходных режимов работы остаются не использованными. Сложность экспериментальных исследований в данной области дает основание широкому использованию математического моделирования.

Математическая модель переходных режимов.

Общая схема моделируемой термогазодинамической системы дизельного двигателя с газотурбинным наддувом представлена на рисунке 1, уравнения динамики двигателя и турбокомпрессора – базовые уравнения математической модели. Момент внешней нагрузки M_H и изменение цикловой подачи в переходном процессе q_c задаются по экспериментальным данным. Эффективный момент M_e и другие параметры двигателя определяются при моделировании рабочего процесса поршневой части. Мощности турбины и компрессора N_T и N_K , давление наддува и ряд дополнительных параметров определяются в ходе расчета характеристик турбины и компрессора.

Выпускной трубопровод. Основой при моделировании газодинамических процессов является решение смешанной задачи Коши для неразветвленного выпускного трубопровода с постоянной площадью поперечного сечения. Газ – идеальный, вязкий; течение – одномерное, энергоизолированное. Движение газа описывается системой дифференциальных уравнений неразрывности, движения и энергии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda}{D} \frac{|u|}{2} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где p, ρ, T, u, S – соответственно давление, плотность, температура, скорость и энтропия потока; x, t – координата и время; λ – коэффициент трения.

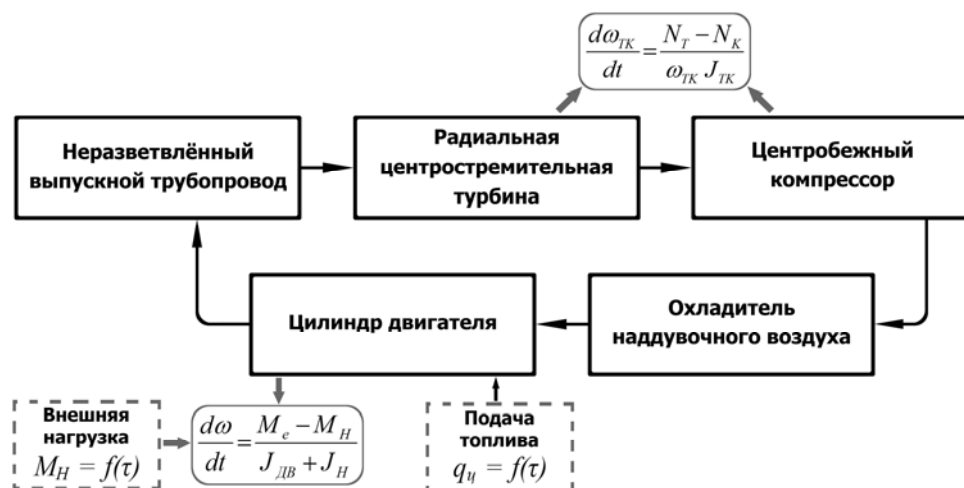


Рисунок 1 – Схема термогазодинамической системы дизельного двигателя с газотурбинным наддувом

Система уравнений (1) решается методом характеристик. Соответственно исходная система дифференциальных уравнений гиперболического типа была преобразована в две системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

для прямой волны

для обратной волны

$$\left\{ \begin{array}{l} R = A + \frac{k-1}{2} U \\ \frac{dR}{dZ} = -\frac{\lambda}{D} \frac{u|u|}{4} L_{TP}(k-1) \\ \frac{dX}{dZ} = U + A \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Q = A - \frac{k-1}{2} U \\ \frac{dQ}{dZ} = \frac{\lambda}{D} \frac{u|u|}{4} L_{TP}(k-1) \\ \frac{dX}{dZ} = U - A \end{array} \right. \quad (2)$$

где R, Q – инварианты для прямой и отраженной волн; U, A – безразмерные скорости потока и звука в среде; X, Z – безразмерные координата и время; D, L_{TP} – диаметр и длина трубопровода.

Системы (2) численно интегрируются методом Эйлера с использованием фиксированной сетки в плоскости X, Z . Для изоэнтропийного потока применена явная разностная схема как наиболее удобная. Расчет ведется по слоям, параметры потока известны на предыдущем временном слое в каждой узловой точке, затем по соотношениям (3, 4) определяются параметры на новом временном слое в i -ом сечении трубопровода.

$$R_{i+1,2} = \frac{\Delta Z}{\Delta X} \left(\frac{k+1}{2(k-1)} R_{i,1} - \frac{3-k}{2(k-1)} Q_{i,1} \right) (R_{i,1} - R_{i+1,1}) + R_{i+1,1} - \frac{\lambda}{D} \frac{U|U|}{4} L_{TP} (k-1) \Delta Z, \quad (3)$$

$$Q_{i,2} = \frac{\Delta Z}{\Delta X} \left(\frac{3-k}{2(k-1)} R_{i+1,1} - \frac{k+1}{2(k-1)} Q_{i+1,1} \right) (Q_{i+1,1} - Q_{i,1}) + Q_{i,1} + \frac{\lambda}{D} \frac{U|U|}{4} L_{TP} (k-1) \Delta Z. \quad (4)$$

Граничные условия у цилиндра описываются моделью эквивалентного сопла для течения газа в выпускном канале. Это позволяет связать параметры в цилиндре и начальном сечении трубопровода через уравнения энергии, неразрывности и адиабатического изменения состояния. Они решаются совместно с уравнениями прямой и отраженной волн в начальном сечении. Отличие модели от реальной картины течения учитывается коэффициентом расхода канала.

При установлении *граничных условий у турбины* необходимо учесть, что поставленные цели требуют оценки эффективности срабатывания импульса давления в турбине, определения ее мощности и КПД. В работе используется следующий тип граничных условий – модель эквивалентного сопла (для всей турбины) пропускная способность, которого определяется через расчет характеристик турбины. Течение через сопло принимается квазистационарным, изоэнтропическим. Давление на срезе сопла считается равным давлению за турбиной. Уравнения граничных условий решаются методом Ньютона. Блок-схема расчета представлена на рисунке 2, где μf_T – эффективное проходное сечение турбины; f_{CA} – площадь проходного сечения соплового аппарата; p_T , T_T – давление и температура перед турбиной; p_{T0} – давление за турбиной; $\Delta G(p_T) = G_C - G_{TP}$, G_C и G_{TP} – расходы газа через эквивалентное сопло и расчетное сечение трубопровода соответственно.

Турбина. Характеристики радиально-осевой турбины определяются путем газодинамического расчета параметров потока на среднем диаметре меридиального сечения в одномерном квазистационарном приближении. В этом случае используются уравнения энергии, неразрывности, моментов количества движения и адиабатического изменения состояния, а также ряд эмпирических зависимостей для определения потерь в элементах проточной части. Незвестное давление на выходе из соплового аппарата определяется из условия равенства расходов через сопловой аппарат и рабочее колесо.

Коэффициент скорости в сопловом аппарате определяется с учетом профильных и концевых потерь, режима течения газа (числа Re) и конструктивных параметров решетки. Коэффициент скорости в рабочем колесе на произвольном режиме с учетом потерь при нерасчетных углах входа определяется по модифицированному уравнению Степанова Г.Ю. [1]. Учитываются потери с выходной скоростью, потери от утечек, трения и раздельного подвода газа [1,2].

Компрессор и охладитель надувочного воздуха. Расчет характеристик центробежного компрессора сводится к определению параметров газа в характерных элементах проточной части при заданной их геометрии. Рассматривается одномерное установившееся течение на среднем диаметре меридиального сечения. Это позволяет использовать уравнения неразрывности, энергии и политропного изменения состояния. Для учета реальной картины течения эти уравнения дополнены эмпирическими зависимостями, позволяющими учесть потери в элементах проточной части и неоднородность потока в поперечных сечениях каналов. Коэффициент мощности компрессора на произвольном режиме работы определяется по уравнению, предложенному Левковичем С.А. [3]. Для определения потерь в рабочем колесе, диффузоре и улитке используются зависимости, предложенные в работах [1, 4, 5].

Снижение температуры и потери давления в охладителе надувочного воздуха определялись по полуэмпирическим уравнениям гидравлической характеристики охладителя, представленным в работе [6].

Цилиндр двигателя. Процессы в цилиндре в общем случае описываются уравнением первого закона термодинамики для открытых систем, уравнениями массового баланса и со-

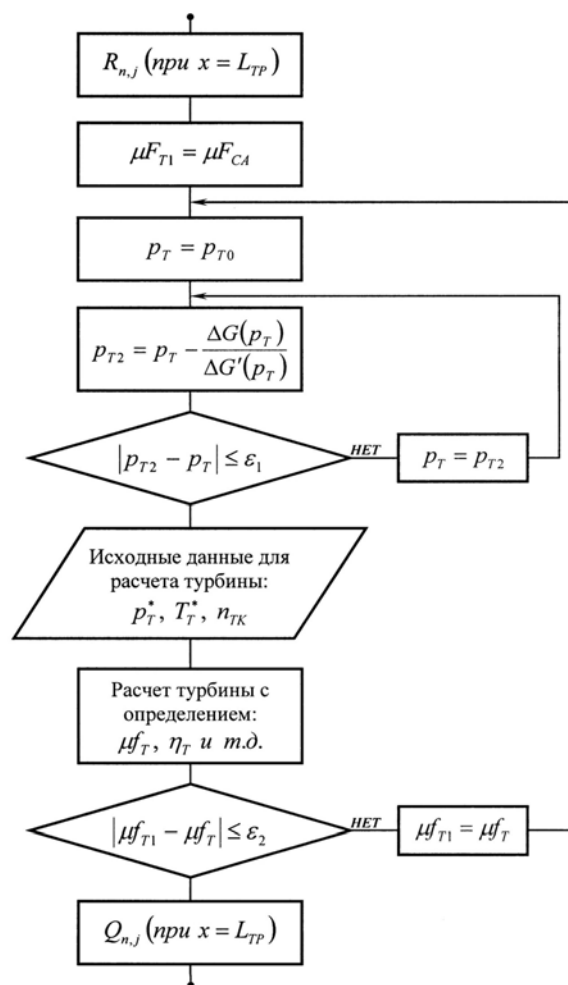


Рисунок 2 – Блок-схема расчета граничных условий у турбины

стояния идеального газа. Эта система решается методом последовательных приближений на каждом расчетном шаге по углу поворота коленчатого вала в следующем виде:

для процесса сгорания

$$p_i = \frac{T_i^{(H)} G_i R}{V_i}$$

$$T_i = \left[C'_{Vi} T_i^{(H)} G_i - p_i (V_i - V_{i-1}) + dQ_X + dQ_W \right] \frac{1}{C'_{Vi} G_i}, \quad (5)$$

$$\left| T_i - T_i^{(H)} \right| \leq \varepsilon$$

для процессов сжатия и расширения

$$p_{i+1} = p_i \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{n'}$$

$$T_{i+1} = T_i \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{n'-1}, \quad (6)$$

$$n = 1 + \frac{p_{i+1} V_{i+1} - p_i V_i}{(C_{Vi+1} G_{Vi+1} + C''_{Vi+1} G_{ri+1}) T_{i+1} - (C_{Vi} G_{Vi} + C''_{Vi} G_{ri}) T_i - dQ_W}$$

$$\left| n - n' \right| \leq \varepsilon$$

где C_V , C''_V , C'_V – теплоемкости «чистого» воздуха, «чистых» продуктов сгорания и рабочего тела при постоянном объеме; G_V , G_r , G – масса «чистого» воздуха, масса «чистых» продуктов сгорания и масса рабочего тела в цилиндре; dQ_X – количество выделившегося тепла; dQ_W – количество тепла, участвующее в теплообмене; $T_i^{(H)}$ и T_i – температуры первого и второго приближения соответственно; n' и n – показатели политропы первого и второго приближения соответственно.

При расчете газообмена расход через впускные и выпускные каналы определяется с учетом режима и направления течения в зависимости от перепада давления в цилиндре двигателя и смежных с ним системах.

Расчет дифференциальной характеристики тепловыделения производится по методу, предложенному Петровым В.А. и Алексеевым В.А. [7]. Метод был использован авторами при моделировании переходного процесса и показал приемлемую точность.

Периоды от начала сгорания до первого и второго максимумов кривой тепловыделения, доли тепла, выделившиеся в первой и второй фазах сгорания (φ_1 , φ_2 и x_1 , x_2 соответственно), определяются в зависимости от относительной длительности периода задержки воспламенения $\bar{\varphi}$.

$$\frac{dX}{d\varphi} = \frac{2,5 x_1}{\varphi_1^{3,5}} \varphi^{2,5} \exp \left(-0,714 \left(\frac{\varphi}{\varphi_1} \right)^{3,5} \right) + \frac{0,5 x_2}{\varphi_2^{1,5}} \varphi^{0,5} \exp \left(-0,33 \left(\frac{\varphi}{\varphi_2} \right)^{1,5} \right), \quad (7)$$

$$\bar{\varphi} = \Delta\varphi_i / \Delta\varphi_{ВПР},$$

$$x_1 = 0,474 \bar{\varphi} - 0,129 \text{ при } \bar{\varphi} \leq 1,1, \quad x_1 = 0,475 - 0,088 \bar{\varphi} \text{ при } \bar{\varphi} > 1,1,$$

$$x_2 = 0,99 - 0,0163 (\bar{\varphi} - 0,5)^2 - x_1,$$

$$\varphi_1 = 2,325 - 0,25 \bar{\varphi}, \quad \varphi_2 = 3,5 + 1,284 (\bar{\varphi} - 2,75)^2.$$

где $\Delta\varphi_i$ – период задержки воспламенения, град. п.к.в.; $\Delta\varphi_{ВПР}$ – продолжительность впрыска топлива, град. п.к.в.

Коэффициент теплоотдачи от газов стенкам цилиндра рассчитывается по уравнению Г. Эйхельберга.

Общие подходы к моделированию. Перед моделированием заданного переходного режима осуществляется расчет исходного установившегося режима, что необходимо для определения начального состояния термогазодинамической системы. В этом случае исполь-

зуется принцип замкнутого моделирования рабочего цикла. Цикл замыкается по трем параметрам:

- давление в выпускном трубопроводе в момент открытия выпускного клапана p_p ;
- баланс мощностей турбины и компрессора $N_T = N_K$;
- давление в цилиндре в момент открытия выпускного клапана p_c .

Моделирование начинается с момента открытия выпускного клапана. Для периода выпуска (включая перекрытие фаз газораспределения) рассчитывается изменение давлений в выпускном трубопроводе и цилиндре, а также выполняется расчет мгновенных параметров турбины. Практика расчетов подтвердила незначительное отклонение начальных и конечных значений давления в выпускном трубопроводе по импульсу. Это позволяет принять допущение о равенстве начальных и конечных давлений по импульсу и использовать это положение при моделировании. Если равенство не соблюдается (с заданной точностью), то расчет повторяется с новым значением давления p_p . После установления давления p_p рассчитываются параметры компрессора. Если интегральная мощность турбины и мощность компрессора не совпадают, то расчет повторяется от момента открытия выпускного клапана с новым значением n_{TK} . Внутренний цикл по p_p также повторяется. После установления равенства мощностей и, соответственно, давления наддува выполняется расчет процессов в цилиндре и установление давления p_c . Схема замкнутого моделирования представлена на рисунке 3. Таким образом, рассматриваемая модель позволяет рассчитывать любой установившийся режим по скоростной или нагрузочной характеристике.

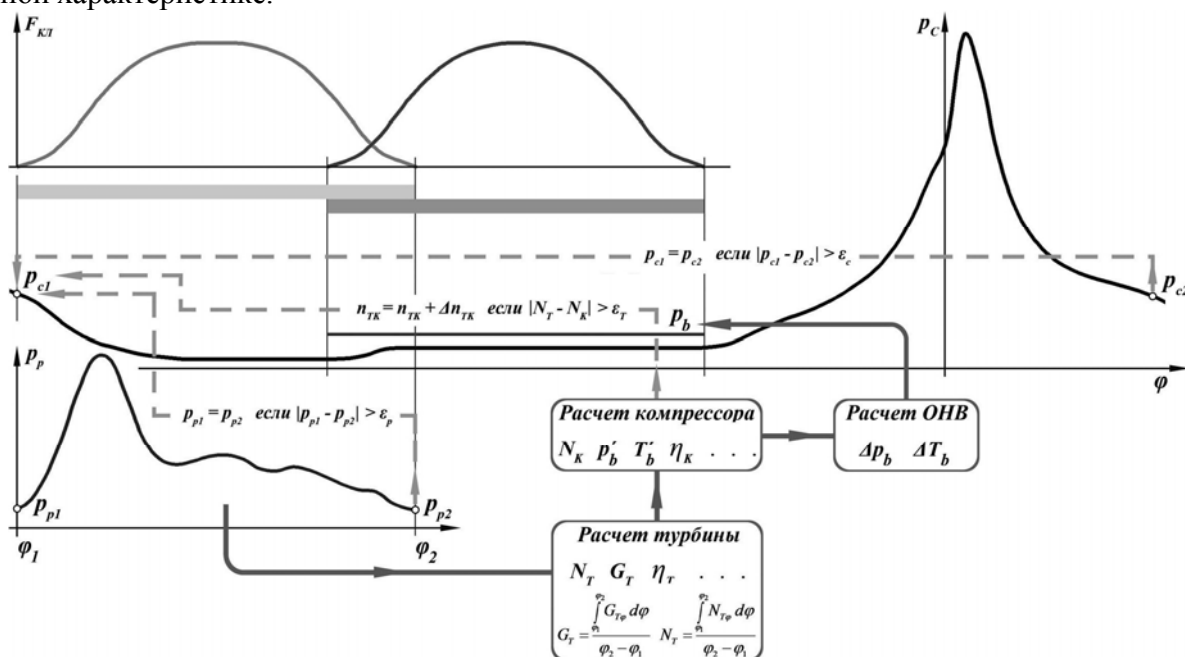


Рисунок 3 - Схема замкнутого моделирования рабочего цикла двигателя

При переходе к расчету переходного режима замкнутая модель «размыкается». Переходный режим разбивается на ряд квазиустановившихся циклов, соответствующих рабочим циклам двигателя, в этом случае параметры текущего цикла становятся начальными для следующего.

Общая блок-схема математической модели представлена на рисунке 4.

Проверка адекватности математической модели.

Объектом исследований являлся дизель-генератор ДГРА 200/750 с дизелем 6 ЧН 18/22 ($P_{me} = 1,07$ МПа) и турбокомпрессором ТКР-14С.26.

Адекватности математической модели проверялась на трех уровнях:

Нагрузочные характеристики, дизеля 6 ЧН 18/22 (рис. 6) показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных (особенно в области высоких нагрузок). Наибольшие расхождения наблюдаются при малых и средних нагрузках, но они вполне допустимы (не более 3 %).

Сравнение результатов испытаний и моделирования переходного процесса, вызванного приёмом нагрузки от 0 до 100 % (рис. 7) показывает приемлемое их совпадение. В целом характер изменения всех параметров одинаков. Разница по провалу частоты вращения составляет около 5 %, по продолжительности переходного процесса – 6 %. Наибольшие отличия в изменении частоты вращения наблюдаются в первой фазе процесса. Это объясняется принятыми допущениями и неполным отражением математической моделью особенностей процесса сгорания при малых значениях коэффициента избытка воздуха.

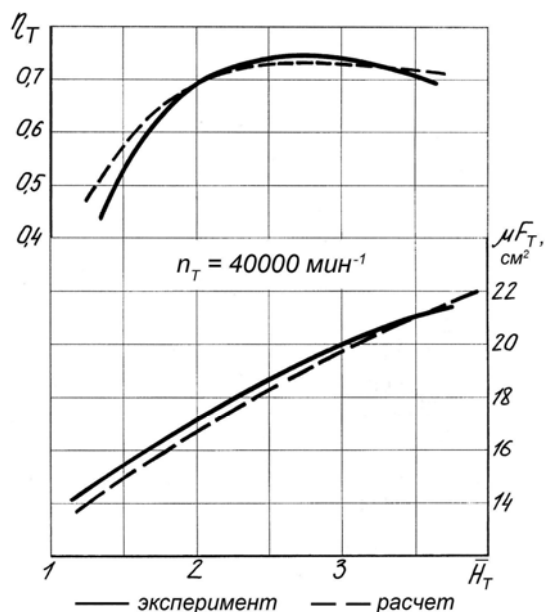


Рисунок 5 – Характеристика турбины ТКР-14С.26

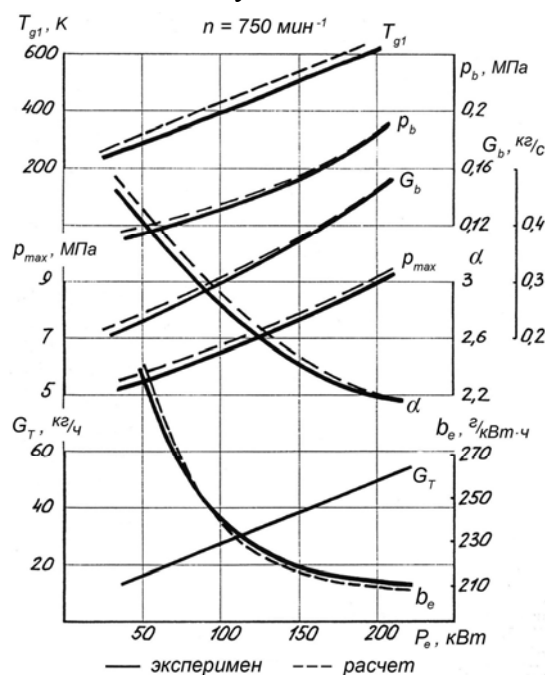


Рисунок 6 – Нагрузочная характеристика дизеля 6ЧН 18/22

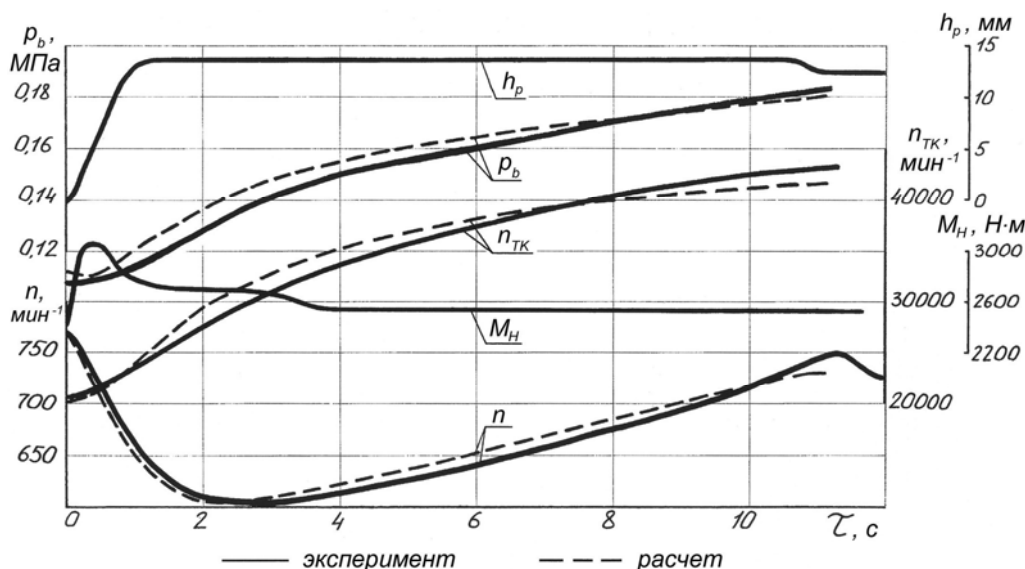


Рисунок 7 – Переходный процесс дизеля 6 ЧН 18/22 при приёме 100% нагрузки

Результаты исследований.

Объектом исследований является дизель-генератор, поэтому в качестве моделируемого был выбран один из наиболее тяжелых переходных режимов для дизелей данного назначения – прием полной нагрузки ненагруженным дизелем. В этом случае основной критерий, характеризующий динамику двигателя – длительность переходного процесса приёма нагрузки τ . Выбор параметров поршневой части двигателя, проточной части компрессора и турбины определялся возможностью изменения данных параметров при настройке двигателя на наилучшие показатели переходного процесса, а также возможностью их регулирования в самом переходном процессе.

Влияние проточной части компрессора. В качестве основных параметров характеризующих проточную часть центробежного компрессора были выбраны: тип диффузора (лопаточный или безлопаточный), угол установки лопаток рабочего колеса на входе β_{1K} , внешний диаметр рабочего колеса на входе D_{1K} , угол установки лопаток диффузора на входе $\alpha_{3Л}$ и угол установки лопаток диффузора на выходе $\alpha_{4Л}$. Влияние выбранных параметров на длительность переходного процесса представлено на рисунке 8 (значения параметров и длительности переходного процесса даны в относительном виде).

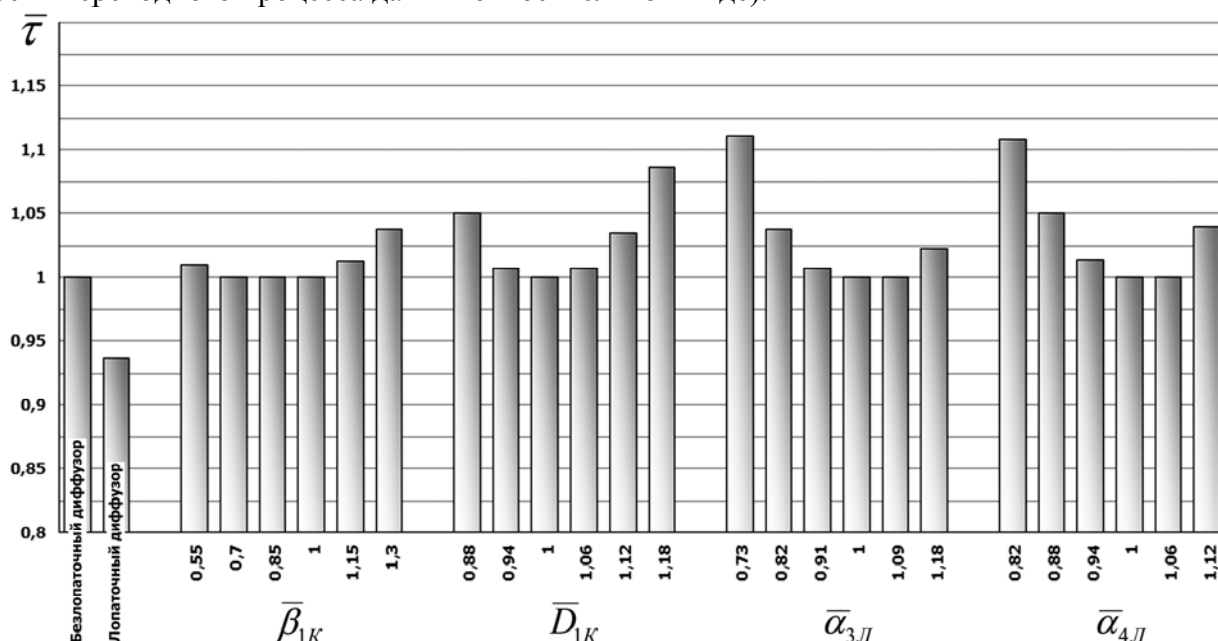


Рисунок 8 – Влияние параметров проточной части компрессора на длительность переходного процесса

Хорошо заметно, что из всех параметров положительное воздействие оказало только изменение типа диффузора (лопаточный диффузор позволил сократить длительность процесса на 6,5%). Изменение остальных параметров привело к увеличению длительности переходного процесса.

Объем статьи не позволяет представить изменение давления наддува, частоты вращения ротора турбокомпрессора, КПД компрессора и других параметров системы наддува в переходном процессе для каждого из рассматриваемых параметров проточной части компрессора, и заставляет перейти непосредственно к выводам. Анализ полученных результатов показал, что любой элемент проточной части компрессора воздействует на динамику переходного процесса только через изменение КПД компрессора.

Влияние параметров двигателя и проточной части турбины. По двигателю исследовалось влияние конструкции крышки цилиндра (один выпускной клапан и два выпускных клапана), момента инерции ротора турбокомпрессора J_{TK} , угла опережения впрыска топлива $\Theta_{впр}$; по турбине – угла установки лопаток соплового аппарата на выходе α_{1CA} , наружного диаметра рабочего колеса на выходе D_{1T} и угла установки лопаток рабочего колеса на выходе β_{2PK} .

Влияние указанных параметров на длительность переходного процесса представлено на рисунке 9.

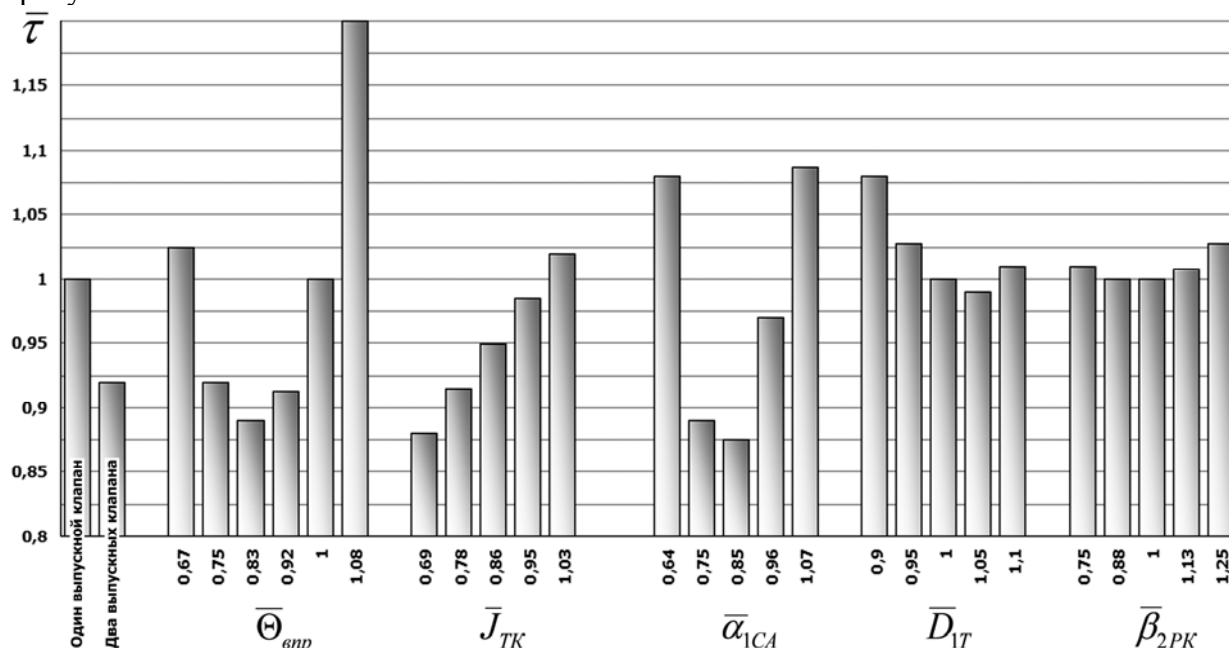


Рисунок 9 – Влияние параметров двигателя и проточной части турбины на длительность переходного процесса

Можно отметить следующее:

- использование крышки цилиндра с двумя выпускными клапанами дает заметный положительный эффект (длительность процесса сократилась на 7,6%);
- при уменьшении угла опережения от паспортного значения для данного двигателя ($\Theta_{впр} = 24^\circ$) на 17% наблюдается точка минимума длительности переходного процесса (снижение на 11%);
- положительный эффект от уменьшения момента инерции ротора турбокомпрессора ниже ожидаемого (снижение на 31% привело к снижению длительности процесса только на 12%);
- изменение угла установки лопаток соплового аппарата на выходе оказывает существенное воздействие на длительность переходного процесса (максимальное снижение на 13% наблюдается при уменьшении угла на 15%);
- любые изменения геометрических параметров рабочего колеса турбины не приводят к заметным положительным эффектам (максимальное сокращение длительности процесса 1% и только при варьировании наружного диаметра рабочего колеса).

Детальный анализ параметров системы наддува в переходном процессе позволил установить следующее:

- основная причина ухудшения динамики переходного процесса – снижение располагаемой энергии газов перед турбиной;
- при уменьшении угла опережения впрыска топлива, снижении потерь в системе выпуска за счет использования двух выпускных клапанов, уменьшении угла установки лопаток соплового аппарата располагаемая энергия газов в переходном процессе повышается, что является причиной заметного положительного влияния данных факторов;
- рабочее колесо турбины воздействует на динамику переходного процесса только через изменение КПД турбины.

Выполненный цикл исследований позволил сделать следующие обобщающие выводы.

1. Для дизеля, работающего в составе дизель-генератора, более предпочтительным является использование компрессора с лопаточным диффузором. Его установка повышает КПД компрессора в переходном процессе, что компенсирует недостаток воздухообеспечения.

2. Влияние на динамику переходного процесса геометрии проточной части компрессора очень не значительно, проточная часть компрессора уже в значительной степени «настроена» на обеспечение минимальной длительности. Вводить регулирование компрессора в переходном процессе не целесообразно.

3. Существенное воздействие на динамику процесса возможно только при увеличении располагаемой энергии газов перед турбиной, например за счет снижения потерь в системе выпуска, использования четырехклапанных крышек цилиндров вместо двухклапанных, установки оптимального угла опережения впрыска топлива.

4. У дизеля, работающего в составе дизель-генератора, угол опережения впрыска топлива, наилучший по показателям переходных процессов, не совпадает с углом, обеспечивающим высокую топливную экономичность на номинальном режиме. Очевидно, что угол опережения впрыска топлива необходимо назначать с учетом характерных режимов работы двигателя.

5. Возможно использование регулирования угла опережения впрыска топлива и соплового аппарата турбины в переходном процессе.

6. Снижение момента инерции ротора ТК в пределах конструктивных возможностей при неизменной размерности турбокомпрессора не позволяет кардинально повысить динамические показатели переходных процессов.

ВЫВОД

Разработанная математическая модель переходных режимов имеет приемлемый уровень адекватности и может быть использована для численного исследования влияния конструктивных и регулировочных параметров двигателя на показатели выбранного переходного процесса. В ходе исследования получены новые данные о механизмах взаимодействия поршневой части поршневого двигателя и системы газотурбинного наддува в переходных режимах, что позволяет внести существенные дополнения в процесс проектирования современных комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, Л.А. Моделирование газодинамических процессов в дизелях / Л.А. Васильев. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1996.
2. Шерстюк, А.Н. Радиально-осевые турбины малой мощности / А.Н. Шерстюк, А.Е. Зарянкин, – Л.: Машиностроение, 1976.
3. К вопросу об определении коэффициента работы компрессоров для наддува двигателей внутреннего сгорания / С.Л. Левкович, Ю.П. Волошин, Д.М. Кельштейн // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков, 1972. – Вып. 15.
4. Ден, Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров / Г.Н. Ден. – Л.: Машиностроение, 1980.
5. Рис, В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – Л.: Машиностроение, 1981.
6. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Справочное пособие / Б.П. Байков [и др.]. Л.: Машиностроение, 1975.
7. Математическое описание характеристик тепловыделения в турбопоршневых двигателях на различных режимах / В.А. Петров, В.А. Алексеев // Двигателестроение. – 1981. – № 6.

Лашко Василий Александрович

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Тел: (4212) 37-52-17

E-mail: kafdvs@rambler.ru

Тимошенко Денис Владимирович

Кандидат технических наук

ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Тел: (4212) 37-52-17, 21-25-09

E-mail: 19denis75@rambler.ru

V.A. LASHKO, D.V. TIMOSHENKO

THE NUMERICAL RESEARCH OF TRANSITION PERFORMANCE FOUR-STROKE SUPERCHARGING DIESEL ENGINE

The article presents the main approaches and equations used in the mathematical model of transient performance four-stroke supercharging diesel engine. Verifying results of the model adequacy are shown. Main results of a calculation researching are shown.

Keywords: mathematical model, transient performance, four-stroke diesel engine, supercharging, turbocharger, radial turbine, centrifugal compressor.

BIBLIOGRAPHY

1. Vasil'ev, L.A. Modelirovanie gazodinamicheskikh processov v dizel'jah / L.A. Vasil'ev. – Habarovsk: Izd-vo HGTU, 1996.
2. Sherstjuk, A.N. Radial'no-osevye turbiny maloj moshhnosti / A.N. Sherstjuk, A.E. Zarjankin, – L.: Mashinostroenie, 1976.
3. K voprosu ob opredelenii koeficienta raboty kompressorov dlja nadduva dvigatelej vnutrennego sgoranija / S.L. Levkovich, Ju.P. Voloshin, D.M. Kel'shtejn // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – Har'kov, 1972. – Vyp. 15.
4. Den, G.N. Proektirovanie protochnoj chasti centrobezhnyh kompressorov / G.N. Den. – L.: Mashino-stroenie, 1980.
5. Ris, V.F. Centrobezhnye kompressornye mashiny / V.F. Ris. – L.: Mashinostroenie, 1981.
6. Turbokompressory dlja nadduva dizelej. Spravochnoe posobie / B.P. Bajkov [i dr.]. L.: Mashinostro-enie, 1975.
7. Matematicheskoe opisanie harakteristik teplovydelenija v turboporshnevnyh dvigatel'jah na razlich-nyh rezhimah / V.A. Petrov, V.A. Alekseev // Dvigatelsestroenie. – 1981. – № 6.

Lashko Vasily Alexandrovich

Pacific national university

Doctor of technical sciences, Professor

Tel: (4212) 37-52-17

E-mail: kafdvs@rambler.ru

Tymoshenko Denis Vladimirovich

Pacific national university

Candidate of technical sciences

Tel: (4212) 37-52-17, 21-25-09

E-mail: 19denis75@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЖКИ, ПОЛУЧЕННОЙ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЯ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

Исследовано распределение массы и твердости стружек, полученных в процессе торцового фрезерования стандартной и предложенной фрезой. Установлено, что при обработке стандартной фрезой образуются стружки с большей массой и более высокой твердостью.

Ключевые слова: стружка, торцовая фреза, среднеквадратическое отклонение, динамическое воздействие, прерывистое резание.

В процессе эксплуатации железнодорожного транспорта, в частности грузовых вагонов, рабочие поверхности деталей интенсивно изнашиваются, а для их восстановления и ремонта применяют операции наплавки изношенных поверхностей твердым сплавом и последующей механической обработки торцовым фрезерованием.

На рисунке 1 представлена боковая рама (поз.1) железнодорожного вагона с площадками (поз.2) и (поз.3) буксового проема, подлежащими торцовому фрезерованию после наплавки твердого сплава.



Рисунок 1 – Наплавленные прерывистые поверхности боковой рамы, подлежащие торцовому фрезерованию

Как видно на рисунке 1 наплавленные участки (поз.2) и (поз.3) характеризуются значительной неравномерностью снимаемого припуска и наличием впадины, создающей прерывистость обрабатываемой поверхности, что усложняет работу режущего инструмента и является источником повышенного уровня вибрации системы станок – приспособление – инструмент – заготовка.

Сочетание ударного характера работы, свойственного торцовым фрезам, прерывистости и высокой твердости обрабатываемой поверхности заготовки приводит к экстремальным условиям резания, негативно сказывающимся на стойкости режущего инструмента и процессе обработки в целом. В условиях экстремального резания производители вынуждены снижать режимы фрезерования, что приводит к потере производительности процесса обработки.

Повышение эффективности ремонта деталей железнодорожных вагонов возможно путем разработки конструкций торцовых фрез, позволяющих уменьшить ударный характер работы режущего инструмента. Для улучшения выходных параметров процесса торцового фрезерования буксовых проемов и опорной рабочей поверхности боковой рамы железнодорожных вагонов авторами разработана торцовая фреза [1] с двухрядным расположением режущих зубьев, позволяющая разделить припуск на механическую обработку между зубьями обоих рядов. Конструкция фрезы разработана в программной среде Pro-E и изготовлена в металле.

Проведены сравнительные испытания предложенной и стандартной торцовых фрез на операции фрезерования прерывистых поверхностей рам железнодорожных вагонов. Испытания проводились в условиях производства ООО НПО «Экспериментальный завод» (г. Реж Свердловская область) на фрезерном станке ФБ-03/2, предназначенном для обработки плоскостей рам железнодорожных вагонов после наплавки на изношенные рабочие поверхности твердого износостойкого сплава.

Режимы резания, на которых проводились испытания: скорость резания $v = 115$ м/мин; частота вращения $n = 210$ об/мин; припуск на обработку $t = 7,2 - 8,4$ мм; количество проходов $i = 1$; подача $S = 58$ мм/мин; ширина фрезерования $B = 120$ мм.

Материал заготовки сталь 20Г1ФЛ, твердость заготовки до наплавки 216 НВ, твердость наплавленного слоя заготовки – 300 НВ, шероховатость обработанных поверхностей $R_z = 160$ мкм. Режущая часть инструмента – сменные многогранные пластины из твердого сплава MC221.

Оценка показателей, характеризующих процесс торцового фрезерования крупногабаритных заготовок, возможна на базе исследования металлической стружки. Анализируя результаты исследования стружки, можно сделать выводы о том, как протекает процесс торцового фрезерования наплавленных площадок стандартной и разработанной фрезами.

Стружка, образовавшаяся в процессе обработки обеими фрезами, была разделена на несколько групп. Массу стружки определяли взвешиванием на аналитических весах Adventurer Pro «ОНАУС», а твердость стружки измеряли на установке для измерения физико-механических свойств материалов Микроскретч - тестер МСТ фирмы CSM Instruments (Швейцария). Определение твердости материала выполнялось путем вдавливания алмазного индентора (конус индентора составляет 120°) в испытуемый образец. Параметры индентирования: коэффициент Пуассона – 0,3 (poisson's ratio – 0,3); нагрузка предварительного контакта – 0,01 Н (Fn contact – 0,01 N); скорость подведения заготовки к индентору – 16,6 мкм/мин (approach speed – 16,6 $\mu\text{m}/\text{min}$).

Используя экспериментально полученные значения массы и твердости стружки, были построены кривые распределения случайной величины, которые характеризуются функцией $f(x)$ плотности распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (1)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение аргумента x ;

e – основание натуральных логарифмов;

μ – значение аргумента, при котором функция принимает максимальное значение, является центром распределения (группирования) аргумента и в то же время его средней арифметической величиной.

Распределение массы стружек, образованных в результате обработки заготовки как стандартной, так и предложенной торцовой фрезой, подчиняется закону нормального распределения (Гаусса) (рис. 2 а, б).

Из кривых распределения видно, что масса стружки, образованной при обработке стандартной фрезой больше, чем при обработке предложенной фрезой. Это свидетельствует о том, что стандартная фреза снимает припуск более крупными стружками, а предложенная фреза – более мелкими. Это происходит потому, что стандартная фреза имеет один ряд режущих зубьев и при снятии припуска за один проход каждый режущий зуб работает при глубине резания t , равной разности размеров заготовки и детали, то есть величине снимаемого припуска.

Предложенная фреза имеет два ряда режущих зубьев, один из которых расположен горизонтально, а второй – вертикально. При фрезеровании поверхности за один проход весь припуск делится между зубьями обоих рядов, то есть общая глубина резания:

$$t = t_1 + t_2, \quad (2)$$

где t_1 – глубина резания, при которой работают зубья вертикального ряда;

t_2 – глубина резания, при которой работают зубья горизонтального ряда.

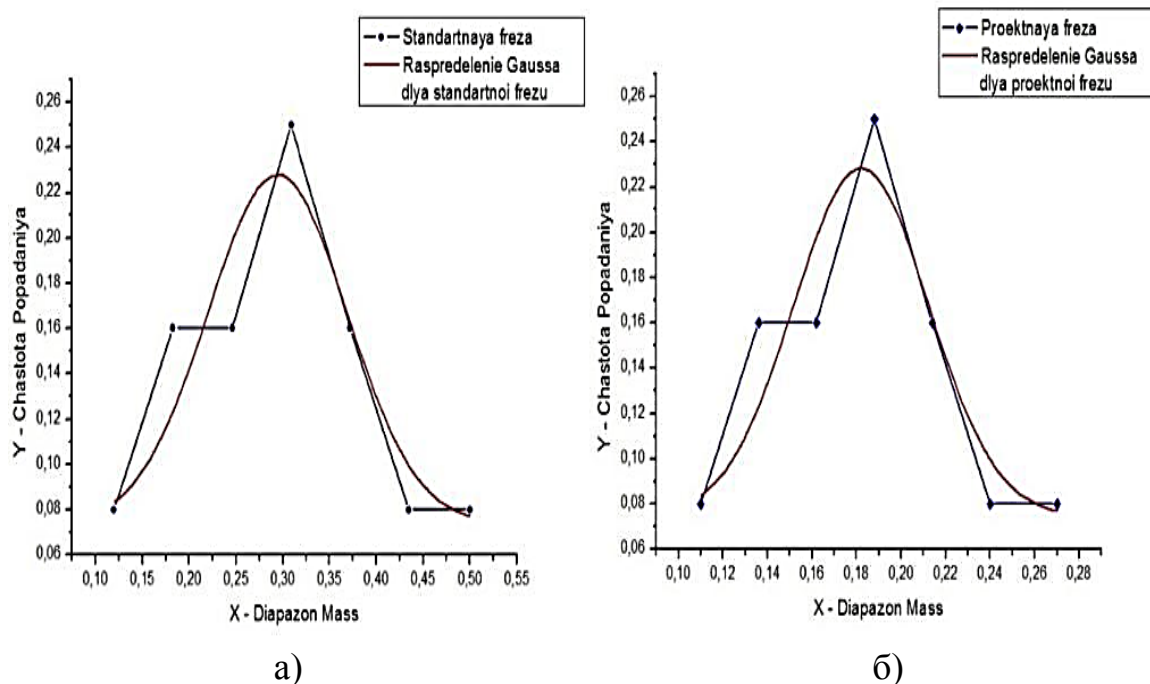


Рисунок 2 – Распределение массы стружки, образованной в результате обработки заготовки стандартной (а) и предложенной (б) торцевой фрезой

В процессе фрезерования стандартным инструментом ширина стружки (без учета ее усадки) равна глубине резания t , а при обработке предложенным инструментом (при $t_1 = t_2$) – в два раза меньше. Поскольку рассматриваемые фрезы имеют одинаковое число зубьев Z , то подача на зуб S_z при работе стандартной фрезы в два раза меньше, чем при работе предложенной фрезы. Для каждого ряда зубьев подача на зуб составляет $2S_z$, вследствие чего максимальная толщина среза при обработке предложенной фрезой больше, чем при обработке стандартной фрезой.

Главная составляющая силы резания при обработке стандартной фрезой определяется по формуле [2]:

$$P_z = \frac{C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z}{D^{q_p} \cdot n^{\omega_p}} \cdot K_p, \quad (3)$$

где C_p – постоянная величина для конкретных условий фрезерования;

x_p, y_p, u_p, q_p , и ω_p – показатели степени при глубине резания t , подаче на зуб S_z , ширине фрезерования B , диаметре D и частоте вращения n фрезы соответственно;

Z – число зубьев фрезы;

K_p – поправочный коэффициент.

Главная составляющая силы резания, при обработке предложенной фрезой определяется по формуле:

$$P_z' = \frac{C_p \cdot (0,5t)^{x_p} \cdot (2S_z)^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z}{D^{q_p} \cdot n^{\omega_p}} \cdot K_p, \quad (4)$$

Показатель степени $x_p = 1,0$ при использовании твердого сплава для режущей части инструмента, а при использовании быстрорежущей стали – $x_p = 0,95$. Показатель степени $y_p = 0,75$ для твердого сплава и $y_p = 0,80$ – для быстрорежущей стали [2]. С учетом этих данных главная составляющая силы резания для стандартной фрезы:

$$P_z = \frac{C_p \cdot t^{(0,95...1,0)} \cdot S_z^{(0,75...0,80)} \cdot B^{u_p} \cdot z}{D^{q_p} \cdot n^{\omega_p}} \cdot K_p, \quad (5)$$

а для предлагаемой фрезы:

$$P_z' = \frac{0,5^{(0,95...1,0)} \cdot 2^{(0,75...0,80)} \cdot C_p \cdot t^{(0,95...1,0)} \cdot S_z^{(0,75...0,80)} \cdot B^{u_p} \cdot z}{D^{q_p} \cdot n^{\omega_p}} \cdot K_p, \quad (6)$$

Сравнение выражений (4) и (5) показывает, что при использовании твердого сплава сила:

$$P_z' = 0,5^{1,0} \cdot 2^{0,75} \cdot P_z = 0,84 \cdot P_z, \quad (7)$$

а при использовании быстрорежущей стали:

$$P_z' = 0,5^{0,95} \cdot 2^{0,80} \cdot P_z = 0,9 \cdot P_z, \quad (8)$$

Таким образом, деление припуска между двумя рядами зубьев предложенной фрезы позволяет уменьшить главную составляющую силы резания на 10...16%, а, следовательно, и энергию удара зубьев инструмента об обрабатываемую заготовку.

При использовании предложенной фрезы снятие материала происходит меньшими объемами, что очень важно для условий ударного характера работы инструмента, поскольку такое удаление припуска приводит к уменьшению силы резания, а, следовательно, и энергии ударов режущих зубьев о материал заготовки. Уменьшение энергии ударов зубьев инструмента о заготовку положительно сказывается не только на увеличении стойкости режущего инструмента, но и точности обработанной поверхности. Повышение стойкости предложенной торцевой фрезы сказывается на уменьшении вспомогательного времени на выполнение технологической операции, а, следовательно, повышении производительности процесса фрезерования.

Исследовали также твердость стружек. Рассчитаны среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение твердости. Для этого стружки, полученные при обработке стандартной и предложенной фрезой, были разделены на группы, выделены интервалы твердости и определено количество попаданий элементов в эти интервалы (табл. 1 и 2).

Таблица 1 – Твердость стружки, полученной при обработке стандартной фрезой

Твердость, HB (xi)	Количество стружек с данной твердостью, шт. (fi)
295	1
296 – 301,5	1
302,5 - 308	2
309 – 314,5	3
315,5 - 321	2
322 – 327,5	2
328,5 – 334	1

Таблица 2 – Твердость стружки, полученной при обработке предложенной фрезой

Твердость, HB (xi)	Количество стружек с данной твердостью, шт. (fi)
295	1
296 – 299,5	1
300,5 - 304	2
305 – 308,5	3
309,5 – 313	2
314 – 317,5	2
318,5 - 322	1

Среднеквадратическое отклонение твердости для стандартной фрезы $\sigma = 49$ и для предложенной фрезы $\sigma = 46$. Применяя правило трех сигма, определили поле рассеивания твердости стружки для каждой из фрез.

Кривые нормального распределения твердости стружки, образованной в процессе торцового фрезерования стандартным и предложенным инструментом, представлены на рисунке 3 а, б.

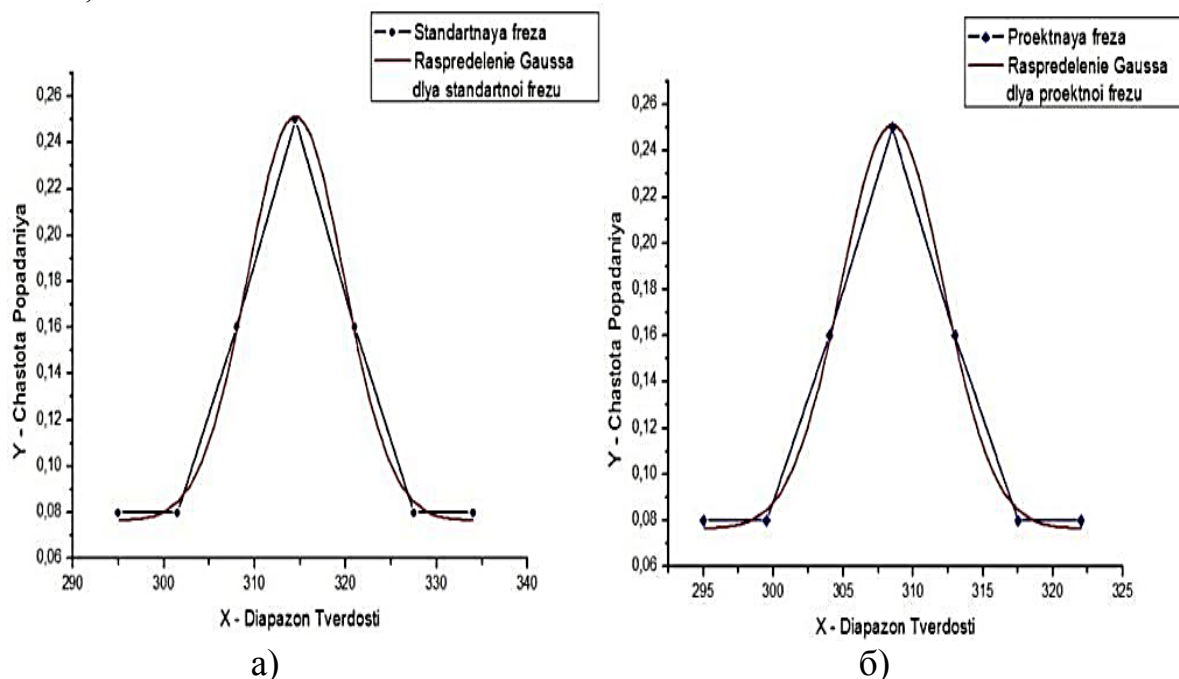


Рисунок 3 – Распределение твердости стружки, образованной в результате обработки заготовки стандартной (а) и предложенной (б) фрезой

Анализ кривых показывает, что твердость стружки после обработки стандартной фрезой выше на 6,2%, чем при обработке предложенной фрезой, что связано сравнительно большей силой резания, вызывающей больший наклеп обработанной поверхности.

Таким образом, при обработке прерывистых поверхностей предложенной фрезой система станок – приспособление – инструмент – заготовка испытывает меньшее динамическое воздействие, обусловленное меньшей силовой нагрузкой на каждый зуб фрезы, что приводит к снижению уровня вибрации и повышению производительности обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решение о выдаче патента РФ от 14.06.2012 г. по заявке на изобретение №2011126839 от 29.06.2011 г. Сборная торцовая фреза.
2. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. Т.2. – М.: Машиностроение, 2001. – 495 с.

Гусев Владимир Григорьевич

Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Адрес: 600015, г. Владимир, проспект Ленина, д. 35А, кв. 10
Тел.: +7 960 7228315, +7 4922 544735
E-mail: prof_gusev@mail.ru

Симаков Алексей Геннадьевич

Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Адрес: 600005, г. Владимир, ул. Асаткина, д. 13, кв. 4
Тел.: +7 904 0376387
E-mail: simakov_aleksey@mail.ru

V.G. GUSEV, A.G. SIMAKOV

RESEARCH OF THE SHAVING RECEIVED IN THE COURSE OF TEST OF FACE MILLS

Distribution of weight and hardness of the shavings received during the face milling by standard and offered mills is investigated. It is proved that at standard mill processing shavings have a higher weight and hardness.

Keywords: shaving, face mill, mean square deviation, dynamic influence, intermittent cutting.

BIBLIOGRAPHY

1. Reshenie o vydache patenta RF ot 14.06.2012 g. po zajavke na izobretenie №2011126839 ot 29.06.2011 g. Sbornaja torcovaja freza.
2. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja / pod red. A. G. Kosilovoj i R. K. Meshherjakova. T.2. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 495 s.

Gusev Vladimir Grigoryevich

Vladimir State University of name A.G. and N. G. Stoletovs, Vladimir
Doctor of Engineering, professor of Technology of Mechanical Engineering chair
Address: 600015, Vladimir, Lenin Avenue, house 35A, apartment 10
Ph.: +7 960 7228315, +7 4922 544735
E-mail: prof_gusev@mail.ru

Simakov Alexey Gennadyevich

Vladimir State University of name A.G. and N. G. Stoletovs, Vladimir
Graduate student of Technology of Mechanical Engineering chair
Address: 600005, Vladimir, Asatkin St., house 13, apartment 4
Ph.: +7 904 0376387
E-mail: simakov_aleksey@mail.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

А.М. КАДЫРМЕТОВ, Г.А. СУХОЧЕВ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрены возможные пути управления качеством плазменных покрытий на основе модуляции электрических параметров косвенной и выносной дуг плазматрона, термо- и электромеханической обработки покрытий. Приведены теоретические и экспериментальные результаты влияния модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий на их качество.

Ключевые слова: плазменное напыление, упрочнение, плазменное покрытие, плазматрон, модуляция параметров, прямая дуга, косвенная дуга, деталь.

Постановка проблемы в общем виде

Плазменное нанесение и упрочнение покрытий относится к прогрессивным технологиям, которые позволяют многократно с высокой эффективностью повышать надежность деталей машин в целом и их долговечность, износ- и коррозионную стойкость, в частности [1-3]. Однако плазменно напыленные покрытия имеют: недостаточную прочность соединения с основой при высоких эксплуатационных нагрузках; слоистость структуры покрытия; повышенную пористость; остаточные напряжения и тенденции отслаивания покрытий при толщинах более 1 мм. Плазменная наплавка позволяет получать качественные монолитные покрытия только со второго слоя ввиду проплавления основного металла и его перемешивания с материалом покрытия. Другим ее недостатком является сильное термическое воздействие на основу, приводящее к высоким остаточным напряжениям, короблению и снижению сопротивления усталости.

Проблемой является достижение высокого качества плазменных покрытий, обеспечивающего их использование при эксплуатационных динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках и лишенных вышеуказанных недостатков на основе поиска методов управления качеством получаемых покрытий с использованием стационарных (установившихся) процессов и динамических эффектов в плазменном нанесении и упрочнении покрытий, в том числе и с использованием совмещенных комбинированных методов.

Анализ достижений и публикаций, научная новизна

Решение проблемы повышения качества плазменных покрытий, лишенных вышеуказанных недостатков, зависит от выбора из общей массы наиболее существенных, лимитирующих факторов, которые могут быть приняты в качестве основных управляющих технологических параметров процесса, и оптимизируемых критериев процесса.

Поэтапная технологическая схема влияния факторов на критерии процесса представлена на рисунке 1. В качестве критериев процесса используются показатели качества покрытий (адгезионная и когезионная прочность, плотность, пористость, шероховатость, равномерность по толщине, уровень остаточных напряжений, однородность состава, микро- и макроструктуры) или поверхностей, триботехнические критерии (коэффициент трения, износостойкость и др.) и интегрированные показатели эффективности технологического про-

цесса (коэффициенты использования материала (КИМ), энергии (КИЭ), полезного действия процесса (КПД), комплексный критерий) [2].

Все основные факторы процесса могут быть условно разделены на несколько групп: конструктивные параметры плазменного распылителя; параметры, характеризующие режим работы плазменного распылителя; параметры напыляемого материала и условий его ввода; параметры, характеризующие внешние условия напыления и параметры плазменной струи и потока напыляемых частиц. Указанная схема влияний факторов плазменного нанесения и упрочнения покрытий на критерии этих процессов позволяет определить пути их совершенствования и методы управления ими. Анализ этих путей (рис. 1), показывает возможности эффективного улучшения качества плазменных покрытий с помощью использования методов динамизации параметров и, в частности, с помощью модуляции электрических параметров [4], а также путем комбинированных и совмещенных процессов с вибромеханической, электроискровой обработкой [2], термо- и электромеханической обработкой [5, 6] и др. (рис. 2).

Модуляция электрических параметров плазмотрона заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средний ток косвенной и прямой (вынесенной) дуг плазмотрона. Использование модуляции электрических параметров процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий содержит в себе научную новизну, заключающуюся в том, что она приводит соответственно к импульсному увеличению или снижению мощности дуг и является технологическим методом, позволяющим просто регулировать электрические и энергетические характеристики дуг и, тем самым, эффективно управлять качеством покрытий [4, 5, 7].

К современным известным прогрессивным технологическим методам упрочнения поверхностей сложного профиля относится комбинированная отделочно-упрочняющая обработка гранулированной токопроводящей средой. В этом случае комбинированная обработка образцов до и после нанесения покрытия проводится на струйнодинамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения [11].

Теоретические результаты

Теоретический анализ процессов нанесения и упрочнения покрытий при модуляции электрических параметров плазмотрона проводился путем разработки математических моделей и последующего моделирования [4]. Расчеты показали, что увеличение частоты модуляции тока дуги ν_m до 3 кГц (при длительности импульсов мощности дуги прямой полярности τ^+ от 20 до 300 мкс и амплитуде импульсов мощности ΔN^+ от 50 до 500 кВт) приводят к увеличению скорости частиц в среднем в 1,3 раза. Более чувствительными к модуляции являются частицы с менее плотным материалом. Показано, что влияние частоты модуляции возрастает с увеличением амплитуды импульсов мощности и с увеличением длительности импульсов. Увеличение длительности и амплитуды импульсов мощности также приводит к увеличению скорости частиц на величину до 40-60%. Влияние модуляции тока дуги плазмотрона на температуру частиц выражается в ускорении их нагрева и плавления. При этом скорости плавления частиц и скорость их движения возрастают пропорционально друг другу.

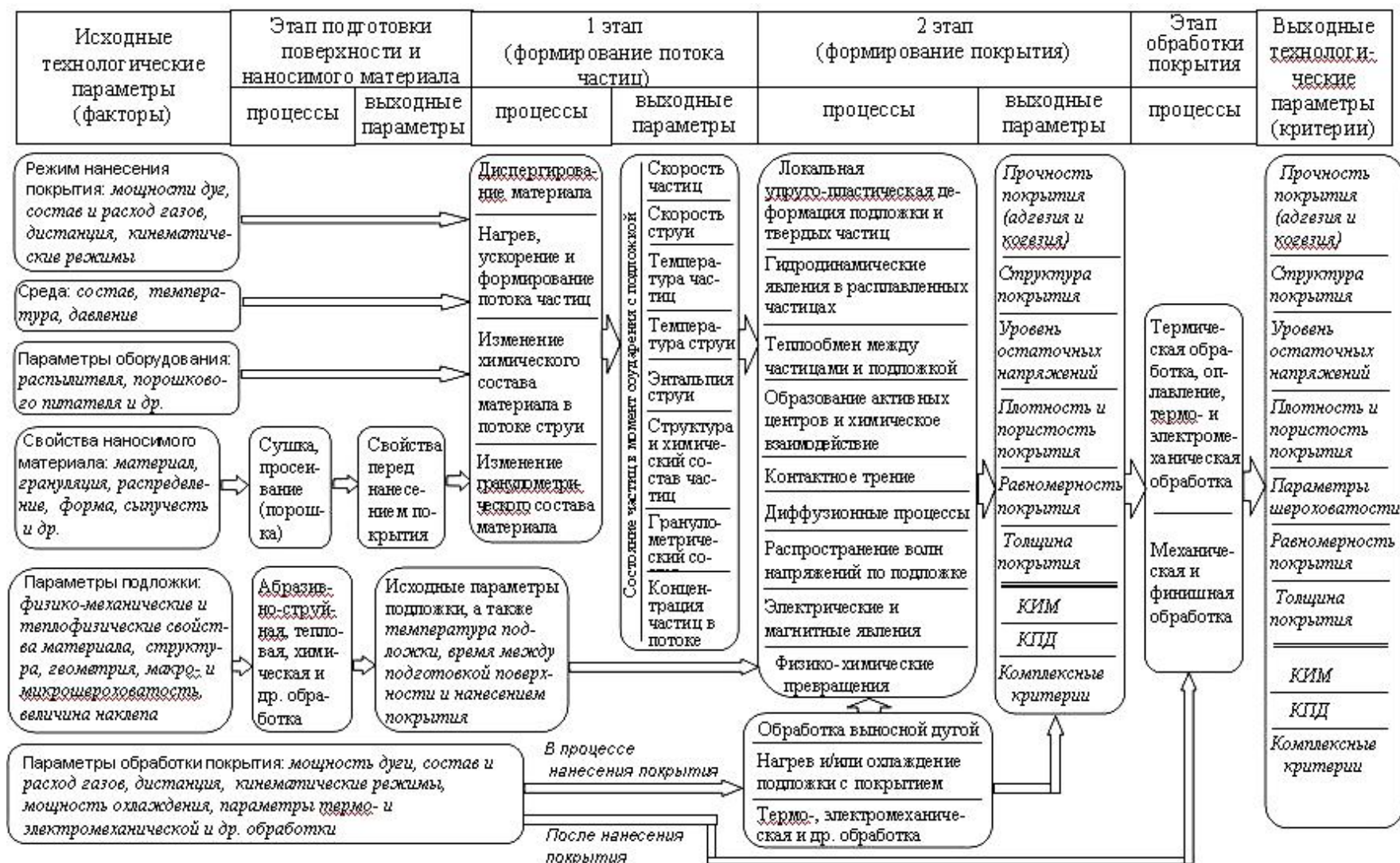


Рисунок 1 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев технологического процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий



Рисунок 2 – Технологические пути совершенствования плазменного нанесения покрытий и упрочнения покрытий, поверхностей

Зависимость температурного поля напыляемой поверхности от параметров модуляции электрических параметров имеет два пространственно-временных аспекта. В локальном пространственно-временном масштабе показано, что при импульсном увеличении мощности выносной дуги в местах её привязки к напыляемой поверхности обеспечивается проплавление поверхности до переходной зоны «покрытие-подложка». Это обеспечивает гарантированное соединение покрытия с подложкой.

В масштабе всей поверхности модуляция мощности выносной дуги позволяет обеспечить равномерность температурного поля основы на всей её поверхности. Результаты расчетов для цилиндрических деталей при напылении по винтовой линии показали, что разброс температур при регулировании мощности импульсов составляет 2...5%. При традиционном использовании предварительного подогрева с помощью плазмотрона без его продольной подачи разброс температур составляет 10...20 %.

В качестве примера приведены расчеты параметров коленчатого вала двигателя КА-МАЗ-740 (рис. 3), которые показали, что разброс температур поверхности напыления уже на третьем витке обработки не превышает 5 °С.

Использование модуляции мощности выносной дуги при напылении на профильные поверхности таких деталей, как рабочие органы транспортных, почвообрабатывающих, лесных и строительно-дорожных машин показало, что неравномерность нагрева на их поверхностях может быть снижена с 600 °С до 10-20 °С.

Результаты моделирования позволили наметить условия проведения экспериментального исследования процесса и задать технические параметры экспериментального оборудования, послужили исходными данными для промышленных разработок средств технологического оснащения для нанесения и упрочнения покрытий.

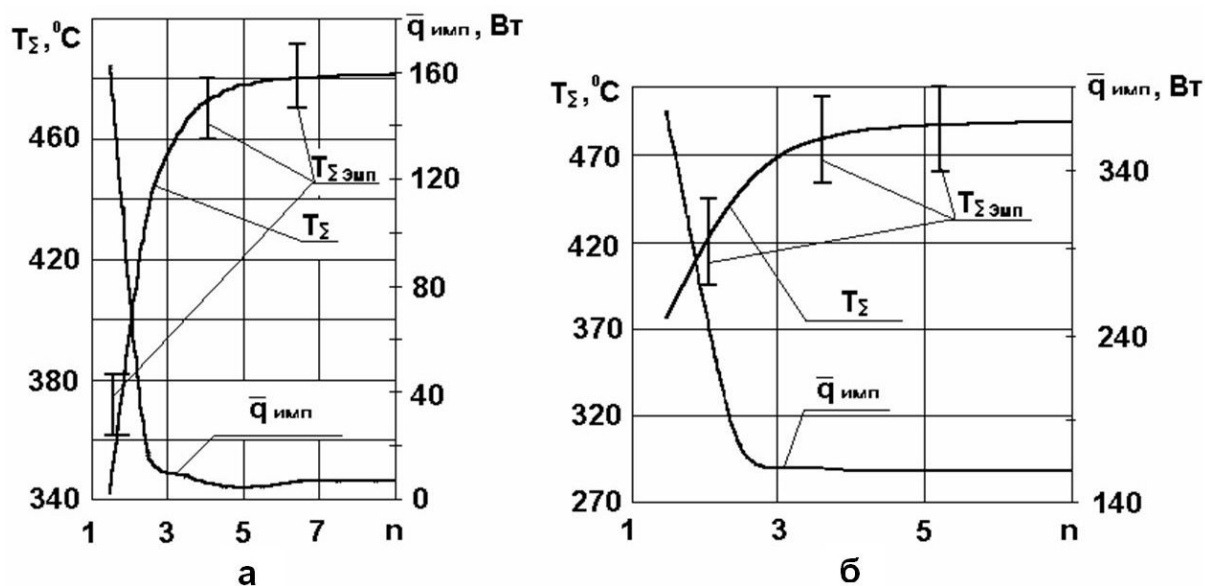


Рисунок 3 – Распределение температуры T_{Σ} поверхности шеек коленчатого вала по количеству витков обработки n

а) шатунная шейка; б) коренная шейка; $T_{\Sigma \text{эмп}}$ – измеренная температура; $q_{\text{имп}}$ – средневзвешенное значение импульсов мощности

Экспериментальные исследования и обоснование полученных результатов

Для проведения экспериментального исследования была разработана установка [7, 9], принципиальным отличием которой от известных является наличие в ней модуляторов токов косвенной и прямой дуг.

Экспериментальные исследования газодинамических и температурных параметров показали [5], что модуляция электрических параметров косвенной и прямой дуги плазматрона приводит к повышению уровня энергетического состояния напыляемых частиц и обеспечению равномерности поля температур и проплавления покрытия до границы «покрытие-основа» в местах привязки выносной дуги во время импульсов её мощности. Это послужило предпосылкой повышения физико-механических и триботехнических свойств покрытий.

Эксперименты показали, что модуляция электрических параметров плазматрона улучшает физико-механические и триботехнические характеристики покрытий [5]. Получено, что модуляция тока косвенной дуги плазматрона увеличивает прочность соединения покрытия с основой на 20-23 МПа (от 15-19 МПа), повышает квазитвердость покрытий на 10-25 HRCэ, микротвердость – на 1-3 ГПа, уменьшает газопроницаемость покрытий в ~ 4-10 раз, повышает износостойкость покрытия в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке в 1,14-1,9 раз.

Анализ типичных микроструктур и рентгеноструктурного анализа покрытий показал, что импульсная модуляция косвенной дуги плазматрона приводит к заметному уменьшению оксидных и неметаллических составляющих в покрытии (в 2-3 раза). При этом основную долю неметаллических включений составляют оксиды: для материала ПН55Т45 – TiO (C, O), для самофлюсующегося материала ПГ-СР4 – Cr_2O_3 , FeO , B_2O_3 , SiO_2 , для материала ПН85Ю15 – кроме перечисленных дополнительно Al_2O_3 . Это может быть обусловлено тем, что при плазменном напылении с модуляцией электрических параметров генерируются ударные волны, воздействие которых на напыляемые жидкие частицы приводит к ударной дегазации кислорода и азота из них.

Модуляция тока прямой (выносной) дуги при оплавлении покрытия в процессе плазменного напыления с помощью косвенной дуги позволяет повысить прочность соединения покрытия с основой на 15-25% и достичь значений 120-150 МПа. При этом по сравнению со случаем без модуляции выносной дуги пористость покрытий снижается с 0,4-0,72% до 0,31-0,51%. Уменьшение пористости способствует увеличению твердости до значений 55-60

HRC_с (с 50-55 HRC для случая без модуляции выносной дуги). Данное улучшение характеристик покрытия может быть объяснено регулярным импульсным воздействием выносной дуги на покрытие с необходимой амплитудой мощности, которое обеспечивает равномерное распределение и увеличение областей локального оплавления покрытия на глубину до границы переходной зоны «покрытие-подложка». Увеличение объема оплавленных зон обеспечивает более полное всплытие пор с флюсом. Более равномерное распределение зон импульсного воздействия выносной дуги обеспечивает уменьшение концентрации напряжений на поверхности детали. Это объясняет увеличение предела выносливости у образцов с покрытиями, полученными без модуляции, со 180 МПа до 210 МПа для образцов с покрытиями, полученными с использованием модуляции.

Металлографический анализ показал увеличение степени дисперсности упрочняющих фаз и пересыщение твердого раствора на основе никеля, что может являться причиной повышения микротвердости покрытия с 5,55-8,91 ГПа (при отсутствии модуляции выносной дуги) до 6,12-10,62 ГПа (в случае модуляции). Повышение степени дисперсности упрочняющих фаз покрытия может быть объяснено кратковременностью импульса и быстрым охлаждением каждой из зон импульсного оплавления. Повышение твердости и микротвердости покрытий приводит к повышению износостойкости покрытий, полученных с использованием модуляции выносной дуги, в 1,25-1,35 раз по сравнению со случаем без модуляции.

Проведение рентгеноструктурного анализа установило присутствие в покрытии следующих фаз: твердого раствора на основе никеля в количестве 38 %, эвтектики в количестве 50% и 12% карбоборидной фазы (карбиды хрома (Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$), бориды никеля и хрома (CrB , Ni_3B , Ni_2B), силициды никеля (Ni_3Si_2 , Ni_2Si) и небольшое количество оксидов хрома, бора, кремния и алюминия). Равномерность температурного поля в начале и конце нанесения покрытия, обеспечивает равномерность распределения вышеуказанных фаз в аналогичных количествах. Сопоставление данных с модуляцией и без модуляции электрических параметров выносной дуги показывает на незначительные качественные изменения в структурных составляющих и изменение количественных соотношений фаз Ni , CrB , CrB_2 , Ni_3B , Ni_2B , Cr_3C_2 , Cr_7C_3 .

Термо- и электромеханическая обработка покрытий позволяет дополнительно повысить качество покрытий [5]. При термомеханической обработке покрытие приобретает более плотную и равновесную структуру, а также остаточные напряжения сжатия вместо напряжений растяжения. При электромеханической обработке одновременно с механическим воздействием, уплотняющим и спекающим частицы покрытия, осуществляется его термическая обработка при высоких скоростях нагрева и охлаждения ($\sim 10^5$ °C/с), приводящая к выделению наноразмерных упрочняющих фаз на основе боридов, карбидов, силицидов [6]. Это приводит к повышению прочности соединения покрытия с основным металлом на 10 % и более, уменьшению его газопроницаемости в 5...6 раз, растеканию и заполнению пор и повышению предела выносливости восстановленных деталей на 14...18 % и более, повышению износостойкости в 1,4 раза и более, уменьшению припуска на шлифование до 0,03...0,05 мм. Однако при толщине покрытий примерно более 0,5 мм термо- или электромеханическая обработка может приводить к растрескиванию и отслаиванию покрытий вследствие наличия в них высоких остаточных напряжений и хрупкости. Устранение данного недостатка возможно за счет совмещения в одной технологической операции процессов плазменного нанесения покрытия с одновременной электромеханической обработкой [12].

Проблемные вопросы

Для дальнейшего совершенствования плазменного напыления покрытий остаются неизученными: влияние импульсно возмущенной плазменной струи на структуру и свойства покрытия; теоретические вопросы совместного использования модуляции и детонации в процессах плазменной обработки материалов при добавлении присадок в плазмообразующий газ; процессы напыления при использовании интенсивных ударных волн, что потребует

разработки плазменной установки с модулятором, питающимся от внешнего источника высокого напряжения.

Повышение эффективности процесса упрочнения покрытий с помощью обработки двумя дугами (для гибридного процесса плазменной наплавки-напыления), имеет ограничение, заключающееся в том, что при использовании прямой полярности выносной дуги перегревается металл детали. Применение обратной полярности в плазменной наплавке (деталь подключается к отрицательному полюсу источника питания) позволяет устранить выявленный недостаток и обеспечить отсутствие непроваров, трещин, пор, несплавления или отслоения и перемешивания основного металла с покрытием [3]. В свою очередь, использование обратной полярности выносной дуги сдерживается недостатками:

- усложняется конструкция и уменьшается ресурс плазматрона;
- дуга обратной полярности, может потерять пространственную устойчивость с «привязкой» к острым кромкам и выступам;
- затруднена наплавка в трудно доступных местах и на ограниченных поверхностях;
- недостаточен опыт применения технологии наплавки на обратной полярности.

Некоторые результаты исследований показывают, что указанные недостатки могут быть устранены путем динамизации процессов с помощью модуляции электрических параметров. Исследование взаимного влияния модуляции параметров обеих дуг на основе математического моделирования и экспериментов позволит обоснованно решить данную задачу.

Совершенствование технологии плазменного напыления в аспекте её развития и универсализации предполагает распространение данной технологии для нанесения толстослойных покрытий (толщиной более 1 мм) и покрытий на внутренние малогабаритные поверхности деталей машин.

Такое дополнение возможностей ВПН позволяет охватить подавляющее большинство деталей, нуждающихся в данной технологии, и обеспечивает высокую производительность процесса, стабильность его выходных параметров при различных возмущающих воздействиях и, следовательно, стабильность качества покрытий.

Выводы

1. Моделирование процессов плазменного напыления и упрочнения покрытий при импульсной модуляции электрических параметров повышает энергетическое состояние частиц в момент удара о подложку, позволяет обеспечить проплавление покрытия в локальных участках поверхности и их заданное распределение в масштабе всей поверхности, что является важной предпосылкой повышения прочности соединения покрытия с основой и уменьшения пористости покрытий;

2. Модуляция тока косвенной дуги плазматрона и регулярное импульсно-модулируемое воздействие выносной дуги на покрытие позволяет улучшить физико-механические и триботехнические свойства покрытий:

– повышается прочность соединения покрытия с основой в 1,5...2 раза; увеличивается твердость покрытия в 1,2...1,7 раз; понижается газопроницаемость покрытия в 4...10 раз; повышается износостойкость покрытия (в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке она возрастает в 1,14...1,9 раз);

– при использовании гибридного процесса напыления-наплавки с помощью косвенной и выносной дуг модуляция последней позволяет получить покрытия с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами: прочность соединения покрытия с основой увеличивается в 1,15...1,25 раза, микротвердость – в 1,1...1,2 раза, сопротивление усталости образцов – до 1,2 раз, износостойкость покрытий – в 1,25...1,35 раза. Пористость покрытий понижается в 1,2...1,3 раза.

3. Управление качеством плазменных покрытий возможно за счет использования импульсной модуляции электрических параметров плазматрона, а при повышенных требованиях к покрытию – за счет совмещенного с напылением или последующего упрочнения вибро-, термо-, электромеханической обработкой. Упрочнение напыленных

плазменных покрытий вибро-, термо- и электромеханической обработкой обеспечивается за счет изменения структуры покрытия, его уплотнения, выделения в нем упрочняющих наночастиц и повышения когезионной прочности между частицами покрытия.

4. Необходимы дальнейшие исследования модуляции параметров процессов нанесения и упрочнения покрытий и использования присадок в плазмообразующий газ с целью совершенствования и повышения эффективности этих технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко. – М.: Наука, 1990. – 406 с.
2. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозиов». 2-е изд., перереб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 360 с.
3. Соснин, Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.
4. Кадырметов, А.М. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий / А.М. Кадырметов, Г.А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. – №4(52). – С. 25-28.
5. Сухочев, Г.А. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий / Г.А. Сухочев, А.М. Кадырметов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. – №11(47). – С. 53-56.
6. Багмутов, В.П. Структура и механические свойства плазменных покрытий после электромеханической обработки / В.П. Багмутов, В.И. Калита, И.Н. Захаров, С.Н. Паршев // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 3. – С. 22-28.
7. Патент № 2211256 РФ, МПК 7 С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / Д.И. Станчев, А.М. Кадырметов, В.Н. Бухтояров, А.В. Винокуров. БИ № 24. 2003.
8. Сухочев, Г.А. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой / Г.А. Сухочев, О.Н. Кириллов, А.М. Кадырметов, и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №8(68). – С. 39-44.
9. Кадырметов, А.М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров / А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев, Г.А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №11(71). – С. 41-48.
10. Кадырметов, А.М. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой / А.М. Кадырметов, В.О. Никонов, В.Н. Бухтояров и др. // Станочный парк. – 2012. – №6. – С. 58-60.

Кадырметов Анвар Минирович

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин
E-mail: anvar@vmail.ru

Сухочев Геннадий Алексеевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения
E-mail: suhotchev@mail.ru

A.M. KADYRMETOV, G. A. SUHOCHEV

THE IMPROVEMENTS AND PROBLEM QUESTIONS OF THE PROCESSES OF PLASMA COATINGS AND HARDENING OF COATINGS BASED ON THE ELECTRICAL PARAMETERS MODULATION

Possible ways of plasma coatings quality are shown, which is based on the electrical parameters modulation of indirect and remote arc plasma torch, thermal and electromechanical coating processes. The effect of electrical parameters modulation of the plasma coatings and hardening of coatings on their quality is given.

Keywords: plasma spraying, hardening, plasma coatings, plasma torch, modulation of parameters, direct arch, indirect arch, detail.

BIBLIOGRAPHY

1. Kudinov, V.V. Nanesenie pokrytij plazmoj / V.V. Kudinov, P.Ju. Pekshev, V.E. Belashhenko. – M.: Nauka, 1990. – 406 s.
2. Puzrjakov, A.F. Teoreticheskie osnovy tehnologii plazmennogo napylenija: ucheb. posobie po kursu «Tehnologija konstrukcij iz metallokompozitov». 2-e izd., perereb. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2008. 360 s.
3. Sosnin, N.A. Plazmennye tehnologii. Rukovodstvo dlja inzhenerov. / N.A. Sosnin, S.A. Ermakov, P.A. Topoljanskij. – SPb: Izd-vo Politehn. un-ta, 2008. – 406 s.
4. Kadyrmetov, A.M. Osobennosti processa vozdušno-plazmennogo nanesenija i uprochnenija pokrytij A.M. Kadyrmetov, G.A. Suhochev // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2009. – №4(52). – S. 25-28.
5. Suhochev, G.A. Jeksperimental'nye issledovanija parametrov upravljaemosti processa vozdušno-plazmennogo nanesenija i uprochnenija pokrytij / G.A. Suhochev, A.M. Kadyrmetov // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2008. – №11(47). – S. 53-56.
6. Bagmutov, V.P. Struktura i mehanicheskie svojstva plazmennych pokrytij posle jelektromehanicheskoj obrabotki / V.P. Bagmutov, V.I. Kalita, I.N. Zaharov, S.N. Parshev // Fizika i himija obrabotki materialov. – 2007. – № 3. – S. 22-28.
7. Patent № 2211256 RF, MPK 7 S 23 S 4/12. Sposob nanesenija pokrytija / D.I. Stanchev, A.M. Kadyrmetov, V.N. Buhtojarov, A.V. Vinokurov. BI № 24. 2003.
8. Suhochev, G.A. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva nanesenija zashhitnyh pokrytij kombinirovannoju obrabotkoj / G.A. Suhochev, O.N. Kirillov, A.M. Kadyrmetov, i dr. // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. – 2010. – №8(68). – S. 39-44.
9. Kadyrmetov, A.M. Oborudovanie dlja plazmennogo nanesenija i uprochnenija pokrytij s moduljaciej jelektricheskikh parametrov / A.M. Kadyrmetov, D.I. Stanchev, G.A. Suhochev // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. – 2010. – №11(71). – S. 41-48.
10. Kadyrmetov, A.M. Perspektivy uprochnenija pokrytij metodom plazmennogo napylenija s odnovernennoj jelektromehanicheskoj obrabotkoj / A.M. Kadyrmetov, V.O. Nikonov, V.N. Buhtojarov i dr. // Stanochnyj park. – 2012. – №6. – S. 58-60.

Kadyrmetov Anwar Minirovich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia

Assistant professor of the department “Production, repair and exploitation of machine”

E-mail: anvar@vmail.ru

Suchochev Gennadiy Alekseyevich

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Professor of the department “Machine construction technology faculty”

E-mail: suhotchev@mail.ru

А.В. КИРИЧЕК, С.В. БАРИНОВ, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, А.П. ЛАТАЕВ

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ГЕТЕРОГЕННО УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Установлена возможность получения гетерогенной структуры деформационным упрочнением. Создана конечно-элементная модель комплексных исследований долговечности создаваемого деформационным упрочнением гетерогенного материала в программе Deform.

Ключевые слова: равномерность упрочнения, поверхностное пластическое деформирование, твердость, гетерогенно упрочненная структура, долговечность.

Рабочие характеристики машин и механизмов, как правило, определяются прочностью и долговечностью наиболее нагруженных, ответственных деталей, причиной выхода из строя которых обычно является целый комплекс внешних воздействий, воспринимаемых поверхностным слоем. Поэтому при изготовлении таких деталей используют упрочняющую обработку, которой повышают твердость несущего поверхностного слоя. Однако с повышением твердости материала одновременно снижается его пластичность, что часто негативно сказывается на эксплуатационных свойствах. Одним из решений данной проблемы является создание поверхностного слоя, имеющего одновременно большую твердость и пластичность, т.е. с гетерогенными свойствами.

Для создания структуры однородного материала, чередующей твердые и мягкие участки, перспективным представляется использование упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). Преимуществом использования деформационного упрочнения является наличие плавного перехода от твердых к мягким участкам, что снижает возникновение концентрации напряжений на границах переходов и исключает возможность зарождения микротрещин, приводящих к разрушению. Эта особенность делает ППД одним из наиболее эффективных способов повышения контактной выносливости деталей машин. Однако влияние равномерности упрочнения на сопротивление поверхностного слоя контактными нагрузками до сих пор оставалось неисследованным. Это связано с технологическими сложностями создания известными способами ППД упрочненного поверхностного слоя, обладающего одновременно большой глубиной (до 3 мм и более) и требуемой равномерностью упрочнения.

Статико-импульсная обработка (СИО) является относительно новым способом ППД, который за счет воздействия на упрочняемую поверхность управляемых волн деформации имеет более широкие возможности по формированию упрочненного поверхностно слоя с большой глубиной (до 6...8 мм) и высокой степенью упрочнения (до 6500 МПа) [1]. Технология СИО позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру. При СИО пластическое деформирование упрочняемого материала осуществляется импульсной нагрузкой, которая является следствием возникновения при ударе в ударной системе волн деформации и управляется изменением геометрических параметров ударной системы. Статическая составляющая нагрузки практически не участвует в процессе упругопластического деформирования и предназначена для наиболее полного использования импульсной. В результате импульсного воздействия, упрочненная поверхность состоит из пластических отпечатков, которые перекрываются между собой в определенном порядке (рис. 1). Перекрытие пластических отпечатков при СИО будет определять равномерность упрочнения, которая характеризуется коэффициентом перекрытия

$$K = 1 - \frac{X}{\delta}; \quad X = \frac{S}{f60},$$

где X – расстояние между центрами отпечатков, мм; δ – размер отпечатка, измеряемого в направлении смещения очага деформации, мм; S – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударов, Гц.

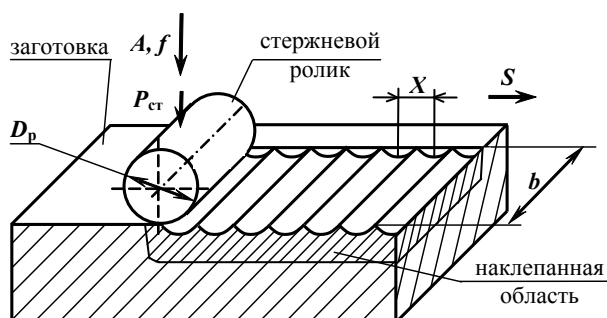


Рисунок 1 – Схема нанесения отпечатков на плоскую поверхность заготовки стержневым роликом при статико-импульсной обработке

A – энергия ударных импульсов, f – частота ударных импульсов, $P_{ст}$ – статическая нагрузка, S – скорость подачи заготовки относительно ролика (мм/мин), D_p – диаметр ролика, b – ширина ролика, X – расстояние между центрами отпечатков

Пределы изменения K составляют от $-\infty$ до 1, однако практическое значение имеет варьирование K в интервале $-1 \leq K \leq 1$. Можно выделить несколько основных вариантов перекрытия отпечатков: 1) $K < 0$, когда $X > \delta$, т.е. отпечатки не перекрываются; 2) $K = 0$, когда $X = \delta$ – край одного отпечатка граничат друг с другом; 3) $0 < K < 1$, когда $X < \delta$ – отпечатки перекрываются; 4) $K = 1$, когда $X = 0$ – полное перекрытие отпечатков, удары наносятся в одно и то же место.

Были проведены экспериментальные исследования гетерогенной структуры, полученной в результате СИО, в ходе которых на плоских образцах стержневым роликом создавался упрочненный поверхностный слой с различной равномерностью, соответствующей изменению коэффициента перекрытия в диапазоне $0 \leq K \leq 0,9$ [2, 3].

По результатам измерений микротвердости было установлено, что упрочненный поверхностный слой состоит из твердых и мягких участков различных размеров. При режимах СИО, когда $0 \leq K \leq 0,5$, формируется явно выраженная гетерогенно упрочненная структура, для которой характерно чередование твердых и мягких областей. При большем перекрытии отпечатков ($0,5 < K \leq 0,9$) более крупные твердые участки расположенные ближе к поверхности могут сливаться друг с другом образуя достаточно равномерно упрочненный поверхностный слой.

Для того чтобы установить влияние различной равномерности упрочнения на долговечность были проведены экспериментальные исследования. Полученные образцы, в целях устранения влияния на долговечность шероховатости поверхности подвергались шлифованию до полного снятия гребней, образованных перекрытием пластических отпечатков, а затем подвергались циклическим контактным нагрузкам на базе 10^6 циклов, контртелами в форме шаров [4].

В результате установлено, что более долговечной (в 3...6 раз больше неупрочненной) оказалась упрочненная структура с коэффициентом перекрытия $0,35 < K < 0,45$. При упрочнении с $K > 0,7$, когда в верхней части упрочненного поверхностного слоя формируются близко лежащие друг к другу твердые участки со степенью упрочнения близкой к предельно достижимой для данной стали, контактное выкрашивание становится больше чем у неупрочненной поверхности. Что можно объяснить значительной потерей пластичности верхней части упрочненного поверхностного слоя металла, которая приводит к быстрому развитию микротрещин и последующему к отслоению металлических частиц [5, 6].

Проведенные экспериментальные исследования показали высокую эффективность применения гетерогенно упрочненной структуры для повышения долговечности при действии на поверхность детали контактных циклических нагрузок и достаточно большие пер-

спективы применения данной технологии для различных деталей машин. Однако более широкое внедрение описанной технологии часто требует проведения нового комплекса описанных экспериментальных исследований с учетом особенностей формы, размеров, материала упрочняемой детали, кинематических особенностей обработки и условий работы упрочненной поверхности. Данный процесс является достаточно сложным и трудоемким: испытания на долговечность одного образца, без учета последующих измерений с использованием микроскопа, обычно составляют порядка 50 часов. Для решения этой задачи необходимо создание модели, позволяющей учитывать особенности процесса создания гетерогенной структуры деформационным упрочнением, в частности статико-импульсной обработкой, и ее испытания на долговечность при действии контактных циклических нагрузок.

В последнее время для моделирования процессов, происходящих в материале при внешнем воздействии на него, успешно применяются автоматизированные средства – системы современного инженерного анализа (CAE), основанные на методе конечных элементов. CAE – системы позволяют в прикладных программах симитировать процессы экспериментальных исследований, которые максимально соответствуют реальным условиям. Существующие CAE-системы подразделяются на универсальные (ANSYS, MSC.Nastran, ABAQUS и т.д.) и специализированные (DEFORM, Qform, Simufact, Forge, и т.д.). Основное их отличие в том, что специализированные CAE-системы позволяют моделировать большие пластические деформации за счет перестроения конечно-элементной сетки по мере искажения форм конечных элементов [7].

Анализ специализированных программ современного инженерного анализа показал, что лидером в данной области является комплекс DEFORM, разработанный компанией Scientific Forming Technologies Corp. (США). Deform обладает современным, интуитивно понятным интерфейсом и позволяет моделировать большой спектр задач обработки металлов давлением. Изучение системы Deform v10.2 осуществлялось на основании временной лицензии предоставленной официальным дистрибьютором программного продукта DEFORM в РФ – инжиниринговой компанией APTEX (г. Москва).

Исследования в Deform гетерогенно упрочненного поверхностного слоя и его влияния на долговечность предлагается проводить в два этапа.

На первом этапе исследований создается модель процесса статико-импульсной обработки, позволяющая прогнозировать развитие напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое, в зависимости от степени перекрытия отпечатков.

Моделирование СЮ начинается с создания объектов: заготовка 2, инструмент 1, стол 5 (рис. 2). Объекты создаются способом задания их геометрии. Геометрию можно задать из имеющихся геометрических примитивов в программе или импортировать из других графических редакторов в формате – STL-файла (стереолитография).

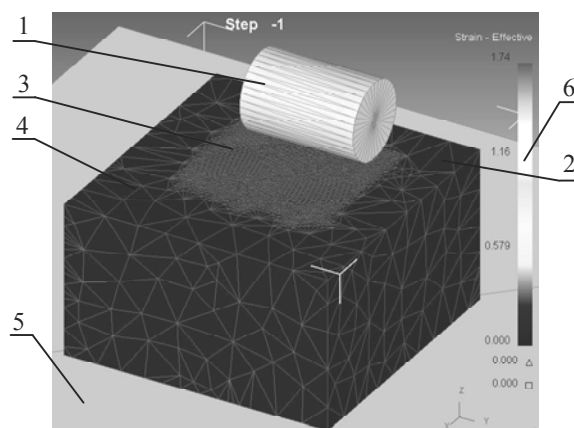


Рисунок 2 – Схема моделирования процесса статико-импульсной обработки в программе Deform 3D

1 - инструмент - стержневой ролик; 2 – заготовка; 3 - конечно-элементная сетка с размером грани 0,3 мм; 4 - конечно-элементная сетка с размером грани 1 мм; 5 - стол; 6 - цветовая шкала для отображения параметров (деформация)

При настройке расчета должны быть определены свойства материалов объектов, а заготовке назначен упругопластический тип материала. Свойства материалов для инструмента и стола не требуются, так как они имеют тип жесткий (недеформируемый). Механические свойства материалов заготовки задаются выбором соответствующей стали из библиотек материалов, имеющихся в программном комплексе.

После определения типа и вида материала в заготовке может быть сгенерирована конечно-элементная сетка. При задании весовых коэффициентов, определяющих зависимость степени измельчения сетки и, следовательно, повышения точности расчетов в данной области, от тех или иных характеристик различных участков заготовки, за наиболее значимую целесообразно принять зависимость степени измельчения от величины эквивалентных деформаций по Мизесу, а за менее значимую – зависимость от кривизны поверхности. Можно считать, что влияние остальных факторов (распределения температуры, скорости деформирования и т.д.) на степень измельчения сетки отсутствует. Таким образом, для упрочнения плоской заготовки, аналогичной по размерам заготовке используемой в эксперименте, может быть сгенерирована конечно-элементная сетка, которая разбивает ее на 120000 элементов (тетраэдров).

Далее определяется установка перемещения инструмента. Особенность моделирования пластического деформирования с помощью метода конечных элементов в современных САЕ-системах состоит в том, что тело, разбитое на конечные элементы (в данном случае заготовка), должно рассматриваться как неподвижное и все рабочие движения следует сообщить инструменту. Например, при моделировании в Deform процесса упрочнения СИО стержневым роликом плоской заготовки, инструмент (ролик) будет совершать возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, а стол с жестко прикрепленной к нему заготовкой будет поступательно перемещаться в горизонтальной плоскости в направлении подачи. Движение инструмента (ролика) задается скоростью деформирования, как функция от времени и зависит от давления в очаге деформации инструмента и заготовки [8]. Движение стола задается как константа перемещения, которая определяется через S – скорость подачи заготовки относительно инструмента.

После задания перемещений объектов, определяется их взаимодействие. Это необходимо для установления связей между объектами. Связи в программе Deform определяются в отношении главный-подчиненный объект. Так, в рассматриваемом примере, деформируется заготовка, размещенная между двумя жесткими объектами – инструментом и столом. Жесткие объекты определяются как главные объекты, а деформируемая заготовка как подчиненный. Для каждого отношения может быть определен ряд свойств (коэффициент трения и коэффициент теплопередачи). Так, например, при моделировании процесса СИО в расчете не учитывается передача тепла и требуется определить только коэффициент трения. Он определяется только между заготовкой и инструментом и считается, что между ними существует Кулоново трение (сталь по стали) с коэффициентом 0,12. В отношении между заготовкой и столом коэффициент трения не учитывается, так как считается, что заготовка жестко закреплена на столе.

После определения отношений создаются контактные поверхности между объектами. Когда создается контакт, любые узлы деформируемого (подчиненного) объекта попадают на инструмент (главный объект) и с определенной погрешностью помещаются на поверхность инструмента. Перед созданием контакта, необходимо определить рациональное значение его точности. Большое значение точности может привести к тому, что слишком много узлов попадает в контакт с поверхностью инструмента, что может разрушить сетку заготовки. Маленькое значение точности может привести к тому, что некоторые узлы не попадут в контакт и контакт не будет создан. Deform – помогает автоматически определить рациональное значение погрешности и поместить его в расчет.

Для установления параметров расчета при поиске решения целесообразно использовать постоянный временной шаг. Количество шагов определяется из условия, что за один шаг инструмент перемещается относительно заготовки на расстояние, не превышающее половины размера минимальной длины стороны конечного элемента.

После завершения настройки задачи, последним шагом установления расчета, является создание файла базы данных. Ядро FEM (часть Deform производящая решение) использует файл базы данных для сохранения конечно-элементного решения задачи. После создания файла базы данных в препроцессоре Deform, вся информация, определенная в препроцессоре (такая как геометрия объектов, свойство материалов, управление перемещением, и т.д.) переносится в файл базы данных. На основании этого файла генерируется база данных.

Далее запускается ход расчета (Simulator) процесса моделирования СИО.

Файловая структура системы Deform размещает все начальные данные и результаты расчета в одном файле. Причем любой рассчитанный шаг в препроцессоре можно превратить в исходный, после чего его можно редактировать добавлять или убирать инструмент, менять его геометрию, изменять параметры процесса, состояние заготовки или инструмента. Благодаря такой структуре, возможно, продолжить любой прерванный расчет, а также вернуться на любой шаг расчета, изменить данные и продолжить расчет с модифицированного шага. Это особенно удобно при моделировании многооперационных процессов при отладке той или иной операции.

По завершению расчета запускается постпроцессор (Post Processor) Deform. В нем можно просмотреть полученный пошаговый ход расчета и определить зависимость величины напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое от степени перекрытия отпечатков.

На втором этапе проводятся исследования долговечности гетерогенно упрочненной структуры, полученной в ходе моделирования СИО.

Для создания модели аналогичной экспериментальным исследованиям, когда на долговечность испытывались плоские образцы при обкатывании их шарами перед началом моделирования обкатывания, с помощью булевой операции удаляются (рис. 3, б) пластические отпечатки ударов инструмента 1 (рис. 3, а) с поверхности заготовки 2, во избежание влияния их на результаты исследований.

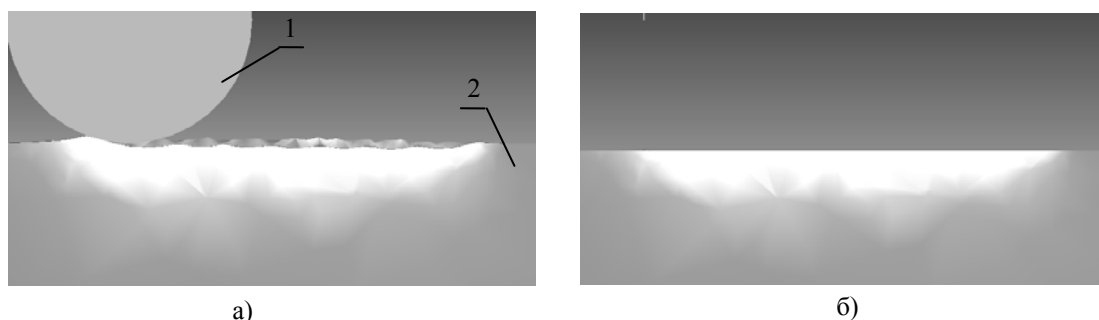


Рисунок 3 – Упрочненная поверхность после СИО, полученная в программе DEFORM: до удаления (а) и после удаления (б) пластических отпечатков

Далее с помощью геометрических примитивов создаются шары 1, которым присваивается жесткий (недеформируемый) тип материала (рис. 4). При определении параметров движения шаров, задается: сила, с которой они давят на поверхность, угловая скорость и координаты центра их качения, а также угловая скорость их вращения вокруг своей оси. При определении взаимодействия объектов шары будут определяться как главные. В настройках параметра контакта указывается коэффициент трения между шарами 1 и заготовкой 2.

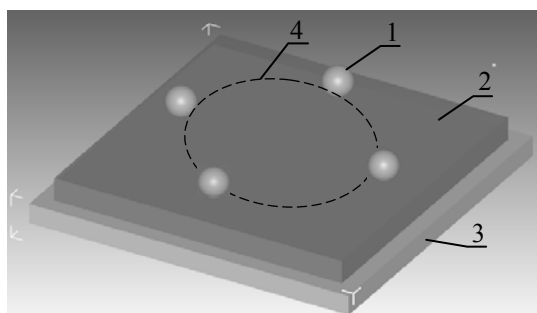


Рисунок 4 – Модель процесса обкатывания шарами гетерогенно упрочненного материала
1 – шар, 2 – заготовка, 3 – стол, 4 – траектория качения шаров

Количество шагов в параметрах расчета задается по аналогии с первым этапом, но только исходя из величины базового цикла нагружения шарами поверхности заготовки. Далее формируется файл базы данных и запускается расчет.

После завершения расчета в постпроцессоре (Post Processor) можно пошагово проследить влияние контактно-усталостных нагрузок на гетерогенно упрочненные элементы материала и оценить их долговечность, используя шкалу накопления повреждений – Damage, которая позволяет определять точки зарождения усталостных трещин в поверхностном слое, т.е. проследить места возможных контактно-усталостных разрушений материала (рис. 5).

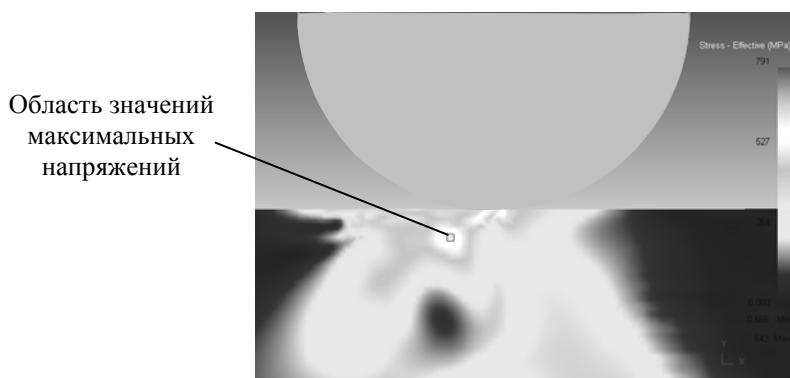


Рисунок 5 – Напряженно- деформационная эпюра, возникающая в гетерогенно упрочненном материале при его обкатывании шарами

ВЫВОДЫ

- установлено, что наряду с твердостью и глубиной упрочненного поверхностного слоя на долговечность большое влияние оказывает равномерность упрочнения;
- установлено, что статико-импульсная обработка является одним из наиболее эффективных методов ППД, который позволяет управлять равномерностью упрочнения на большой глубине (до 6...8 мм) и формировать гетерогенную структуру, повышающую долговечность до 3...6 раз;
- созданная в программе Deform комплексная конечно-элементная модель позволяет симитировать процесс формирования гетерогенно упрочненного материала деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой и процесс контактно-усталостного нагружения полученного материала, определяющий его долговечность.

Исследования проводились при поддержке проекта, выполняемого в рамках гос. задания р/н 75052011

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
2. Киричек, А.В. Влияние режимов статико-импульсной обработки на равномерность упрочнения поверхностного слоя / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 2. – С.13-17.
3. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев / СТИН. – 2007. – №12. – С. 28-31.
4. Киричек, А.В. Экспериментальный комплекс для исследований контактно-усталостного изнашивания деталей машин / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринев, Д.Е. Тарасов // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. - № 3-2/275 (561). – С 7-13.
5. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринев, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7(43). – С.9-15.

6. Соловьев, Д.Л. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно наклепанной структуры / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, С.В. Баринов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 7. – С.4-7.
7. Киричек, А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния резбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // СТИН. – 2007. – №7. – С.21-25.
8. Киричек, А.В. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Н. Афонин, А.В. Волобуев. М.: Машиностроение-1, 2009. – 170 с.

Киричек Андрей Викторович

Госуниверситет - УНПК, г Орел

доктор технических наук, профессор, директор Технологического института

Тел./ fax: (4862)555524

e-mail: avk@ostu.ru

Баринов Сергей Владимирович

Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов»

Тел.: (49234)77145

E-mail: box64@rambler.ru

Соловьев Дмитрий Львович

Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов»

Тел.: (49234)77145

e-mail: murstin@yandex.ru

Латаев Александр Петрович

ООО «Инжиниринговая компания АРТЕХ», г. Москва

Технический директор

Тел.: (495)7956448

www.artech-eng.ru.

A.V. KIRICHEK, S.V. BARINOV, D.L. SOLOVYEV, A.P. LATAEV

FINITE-ELEMENT MODELING AND TESTING OF THE HETEROGENEOUS HARDENED SURFACE LAYER

The possibility of obtaining heterogeneous structures reinforced strain hardening. Created on finite-element model of integrated studies of durability produced by strain hardening of heterogeneous material in the program Deform.

Keywords: uniform hardening, surface plastic deformation, hardness, heterogeneous-reinforced structure, durability.

BIBLIOGRAPHY

1. Kirichek, A.V. Tehnologija i oborudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, A.G. Lazutkin. – М.: Mashinostroenie, 2004. – 288 s.
2. Kirichek, A.V. Vlijanie rezhimov statiko-impul'snoj obrabotki na ravnomernost' uprochnenija poverhnostnogo sloja / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.A. Silant'ev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem. – 2004. – № 2. – С.13-17.
3. Kirichek, A.V. Sozdanie geterogennoj struktury materiala statiko-impul'snoj obrabotkoj / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev / STIN. – 2007. – №12. – С. 28-31.
4. Kirichek, A.V. Jeksperimental'nyj kompleks dlja issledovanij kontaktno-ustalostnogo iznashivanija detalej mashin / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.V. Barinov, D.E. Tarasov // Izvestija OrelGTU, serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – 2009. - № 3-2/275 (561). – С 7-13.
5. Kirichek, A.V. Povyshenie kontaktnoj vynoslivosti detalej mashin geterogennym deformacionnym uprochnenijem statiko-impul'snoj obrabotkoj / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.V. Barinov, S.A. Silant'ev // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. – 2008. – № 7(43). – С.9-15.

6. Solov'ev, D.L. Povyshenie dolgovechnosti detalej mashin sozdaniem geterogenno naklepannoj struktury / D.L. Solov'ev, A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Tjazheloe mashinostroenie. – 2010. – № 7. – С.4-7.
7. Kirichek, A.V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija rez'bonakatnogo instrumen-ta i zagotovki metodom konechnyh jelementov / A.V. Kirichek, A.N. Afonin // STIN. – 2007. – №7. – S.21-25.
8. Kirichek, A.V. Informacionno-analiticheskoe obespechenie uprochnenija statiko-impul'snoj obra-botkoj / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, A.N. Afonin, A.V. Volobuev. M.: Mashinostroenie-1, 2009. – 170 s.

Kirichek Andrey Victorovich

Federal State Budget Educational Institution of Higher Vocational Training "State University – Educational Scientific Production Complex", Orel

Doc. Sc. tech., Prof.

Phone: (4862) 555524

e-mail: avk@ostu.ru

Barinov Sergey Vladimirovich

Murom Institute (Branch of Vladimir State University), Murom Ph.D., assistant professor of the department "Computer aided design of the machines and technological processes"

Phone: (49234) 77145

E-mail: box64@rambler.ru

Solovyev Dmitry Lvovich

Murom Institute (Branch of Vladimir State University), Murom

Doc. Sc. tech. Prof. of the department "Computer aided design of the machines and technological processes"

Phone: (49234)77145

e-mail: murstin@yandex.ru

Lataev Alexander Petrovich

LLC "Arteha Engineering Company", Moscow

Technical director

Phone: (495) 7956448

www.artech-eng.ru.

УДК 621.09.047

С.В. УСОВ, Д.С. СВИРИДЕНКО, Е.В. ГОНЧАРОВ, С.Н. КОДЕНЦЕВ

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАК ФАКТОРА НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

Рассматривается механизм разделения материалов гидроабразивной струей высокого давления и способы повышения качества поверхности разделения. Приведены технологические возможности гидроабразивного разделения материалов струей высокого давления и его сравнение с другими прогрессивными методами разделения.

Ключевые слова: гидроабразивное разделение металлов, сравнение методов разделения, качество поверхности разделения.

В настоящее время в современной технологии машиностроения доминирующее положение занимают технологии, которые практически мгновенно, за весьма ограниченный промежуток времени осуществляют изготовление сложных, фасонных пространственных форм различных деталей. При этом показатели качества поверхностного слоя (шероховатость, микротвердость, фазовый и структурный состав поверхностного слоя и др.) увязываются заказчиками с факторами технико-экономической целесообразности применения того или иного способа, технологического приема, обеспечивающего требуемую производительность, надежность, трудоемкость, снижение сроков подготовки производства, минимизацию затрат на подготовку производства по сравнению с рядом конкурирующих способов и др. Всем вышеизложенным требованиям отвечает группа технологических приемов, включающих: лазерные, плазменные, эрозионные, гидроабразивные методы обработки.

Ликвидность этих технологий одна из самых высоких в мире. Такие методы позволяют динамично осваивать новые изделия авиационно-космической отрасли и характеризуется следующими преимуществами по сравнению с традиционными механическими приемами формообразования:

- сокращением сроков освоения подготовки производства новых изделий от 6 до 10 раз;
- повышением коэффициента использования материала в 3-5 раз;
- сокращением трудоемкости при изготовлении деталей такими технологиями за счет использования режима чертеж – компьютер - готовая деталь;
- обеспечение в поверхностном слое формообразуемых деталей требуемого распределения параметров качества, таких как шероховатость, геометрическая точность, глубина поверхностного слоя, фазовый химический состав материала заготовки;
- модульность структуры комплекта оборудования для реализации данных технологий.

Значимость новых технологий характеризуется снижением периода времени на освоение новых изделий в ведущих индустриальных странах с трех до одного месяца (данные на конец 2001 года). Среди рассматриваемых технологий гидроабразивная выделяется следующими преимуществами:

- деталь (разрезаемый материал) не подвергается термическому воздействию от тепла, выделяющегося при обработке (фактически происходит «холодное» резание);
- отсутствие пыли и газов (поток струи воды уносит с собой продукты обработки);
- низкое тангенциальное усилие резания на деталь (в отдельных случаях даже не требуется зажима разрезаемого материала);
- небольшая ширина реза (что сказывается на уменьшении потерь материала и на улучшении экономичности раскроя);
- высокая скорость резания любых материалов (в том числе диэлектриков);
- возможность получения путем разделения материала сложных контуров, в том числе переходных участков с радиусом скругления менее одного миллиметра.

В начале 40-х годов метод начал использоваться для разработки залежей полезных ископаемых в России, но получил ограниченное признание из-за излишнего дробления твердых топлив, что снижает их энергетические показатели. Известны попытки применения ме-

тогда в Японии, Китае, Канаде. В конце 50-х годов академиком АН СССР, директором института физики высоких давлений, профессором Л.Ф.Верещагиным были начаты исследования по применению водяной струи высокого давления для разделения различных материалов. Для этого создан ряд опытных устройств, по разделению различных сплавов, камня, дерева. Параллельно с этим в 60-х годах в США в штате Мичиган профессор Роберт Франц начал работы в том же направлении. Работая совместно с компанией Ingersoll Rand он разработал нагнетатель с рабочим давлением 4000 атм. Первый коммерческий образец был создан в 1971 г. Другая компания: Flow International также начала процесс индустриального применения данного метода.

Способ гидроабразивного разделения материалов в настоящее время находит все более расширяющееся применение в таких странах, как США, Германия, Италия, Швеция, Австрия, Норвегия, Россия и др.

Согласно отчета исследовательской маркетинговой компании Frost And Sullivan производство систем гидроабразивной резки за рубежом это самый быстро растущий сегмент станкостроительной промышленности с прогнозом уровня роста в 9.1 процента.

Приведенный прогноз позволяет с уверенностью сказать, что развитие технологии гидроабразивной резки является значимым фактором научно-технического прогресса.

Способ гидроабразивной резки позволяет использовать кинетическую энергию струи жидкости, подаваемой со сверхзвуковой скоростью (400-1000 м/с) под давлением 100-800 МПа из отверстия диаметром 0,1-0,4 мм. Сила воздействия такой струи на материал способна вызвать его разрушение с отрывом микрочастиц. Следовательно, в процессе обработки кинетическая энергия струи превращается в механическую работу резания, а сама струя является режущим инструментом. Струя жидкости по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать сложный профиль с различным радиусом скругления. Поскольку ширина реза может быть в диапазоне 0,1-3 мм, то отход материала в стружку существенно меньше, чем при традиционных методах обработки. Рез можно начинать в любой точке заготовки и при этом не нужно предварительно выполнять отверстие. Небольшие силы (1.. 100 Н) и не значительная температура (60-90 °С) в зоне резания исключают деформацию заготовки, а также оплавление и пригорание материала в области, прилегающей к этой зоне, что способствует улучшению качества обработки и позволяет обрабатывать горючие и взрывоопасные материалы. Струя жидкости не изменяет физикомеханических свойств обрабатываемого материала.

Применение гидроабразивной обработки позволяет [1]:

- при необходимости полностью автоматизировать процесс разделения материала;
- исключить из технологического цикла традиционный режущий инструмент, рабочие кромки которого непрерывно изнашиваются;
- высвободить персонал и оборудование, осуществляющих изготовление и переточку инструмента;
- повысить производительность и качество обработки;
- уменьшить отход материала в стружку;
- снизить уровень шума;
- полностью устранить запыленность рабочего места.

Водяной струей можно резать практически любые материалы толщиной до 30 мм, однако наибольший эффект достигнут при резке объектов с толщиной 2...6 мм. В этом случае водяная струя успешно конкурирует с лазерным лучом.

Одним из авторов статьи предложен новый метод комбинированной обработки [2], включающий применение электрического поля для удаления частиц абразива, внедренных струей в поверхность разделения материала (как правило, вязкого металла) и снижения непараллельности стенок паза.

Одним из востребованных потребителей технологии гидравлического и гидроабразивного разделения является радио и приборостроение, где широко используется резка слоистых композиционных материалов (рис. 1).

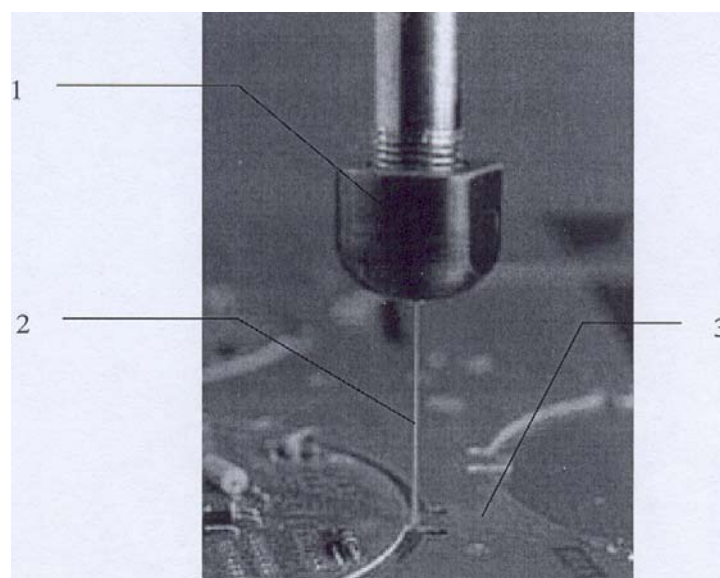


Рисунок 1 – Резка водяной струей

1- режущая головка, 2-водяная струя, 3-обрабатываемая печатная плата

Кинетической энергии струи чистой воды недостаточно для резания твердых материалов, поэтому для обработки металлов и керамики применяют водно-абразивную смесь. Диапазон физико-механических свойств, строения и структуры материалов, обрабатываемых методом гидроабразивной резки достаточно широк. К ним относятся бумага, картон, ткани, кожа, резина, древесина, полимерные материалы (винипласт, фторопласт, органическое стекло, гетинакс, текстолит, стеклотекстолит), фольгированная и металлизированная пластмасса, металлы и сплавы, в том числе труднообрабатываемые (твердые и магнитные сплавы, титан, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, композиционные материалы, керамика) и др.

В настоящее время созданы и внедрены в производство станки, осуществляющие следующие операции: вырезание изделий сложного контура из листового материала, очистку барабанов множительной техники от селеносодержащих покрытий, очистку капиллярных отверстий наконечников, снятие облоя с корпусов микросхем, разрезание корпусов снарядов и вымывание взрывчатых веществ в целях их дальнейшего использования, разрезание корпусов подводных лодок при их утилизации, снятие изоляции с поделочного и облицовочного камня.

Гидрообработка применяется для зачистки днищ судов от моллюсков, для снятия покрасочных материалов с корпусов самолетов и судов, а также покрытий с автодорог и взлетных полос при их ремонте, для очистки магистральных нефте и газопроводов, цистерн и баков различного назначения, при добыче полезных ископаемых.

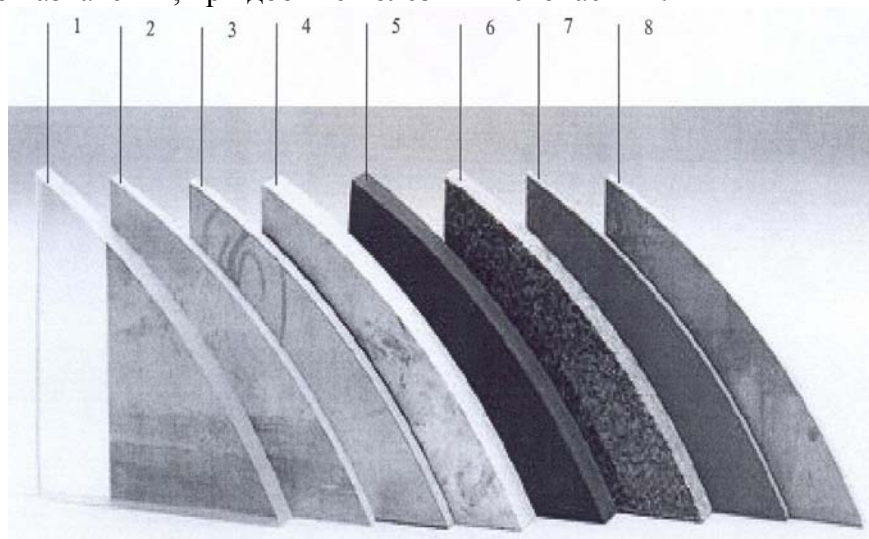


Рисунок 2 – Материалы, обрабатываемые водоабразивным методом

1-стекло, 2-дерево, 3-пластик, 4-мрамор, 5-графит, 6-гранит, 7-керамика, 8-медь

Учитывая перспективность малоотходной, ресурсосберегающей, экологически чистой технологии гидроабразивной резки, в России, США, Германии, Японии, Великобритании, Франции, Швеции, Австрии и других странах успешно ведутся работы по ее применению в космической и ракетной технике, в авиа-, судо-, автомобиле- и приборостроении, в электро-технической, строительной и легкой промышленности, а также в военной технике в целях утилизации вооружений и боеприпасов.

При сравнении метода гидроабразивной резки с существующими технологиями обработки материалов, в частности с лазерной, плазменной, электроэрозионной обработкой, газорезкой, фрезерованием, можно отметить существенные достоинства гидроабразивной резки:

- отсутствует необходимость в инструменте и его замене;
- значительная экономия материала за счет возможности оптимального раскроя и значительно меньшей ширины реза;
- легкость и быстрота программирования;
- возможность резки практически любых материалов.

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества гидроабразивная резка имеет некоторые недостатки, связанные с тем, что в качестве режущего инструмента используется гидроабразивная струя. При резке струя на выходе из материала отстает от точки входа, в связи с этим могут возникать погрешности обработки в следующих случаях:

- при движении по радиусу инерционность струи может вызвать отклонение размеров детали от заданных;
- при резке внутренних углов отставание струи также может влиять на правильность обработки, кроме того при изменении направления резки струя может сделать зарез в детали. Однако эти недостатки можно устранить за счет уменьшения скорости обработки в проблемных местах.

Еще одним существенным недостатком гидроабразивной обработки является конусность кромок получаемых деталей. Угол конуса зависит от ряда параметров: расстояния от режущей головки до обрабатываемой детали, материала детали, скорости обработки, типа используемого абразива. Для уменьшения конусности снижают скорость обработки, а также устанавливают зазор между режущей головкой и деталью минимальным. Эффективным средством, повышения точности геометрии стенок паза в месте разделения материала и устранения шаржирования является комбинация физических воздействий, приведенная в [2].

Таким образом, метод гидроабразивной резки является одним из перспективных для разделения большинства материалов в промышленном производстве. В настоящее время за рубежом работает более 7000 станков различного назначения использующих данный метод. В России и странах СНГ известно не более 70 единиц такого оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов, С.В. Основы технологии гидроабразивной обработки деталей машин / С.В. Усов, Ю.Ф. Назаров, Д.С. Свириденко и др. – М.о., г. Подольск: Славянская школа, 2010. – 148с.
2. Смоленцев, В.П. Формирование поверхностного слоя при гидроабразивном разделении металлов с наложением электрического поля./ В.П. Смоленцев, Е.В. Гончаров//Вестник ВГТУ, 2011, том 7, №7 – С.74-77.

Усов Сергей Вадимович

ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва

Доктор технических наук, профессор МГОУ, вице-президент ООО «Технологические системы защитных покрытий»

Свириденко Данила Сергеевич

Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина, г. Москва

Кандидат технических наук, декан машиностроительного факультета МГОУ, доцент кафедры «Теоретические основы технологии машиностроения»

e-mail: d_sviridenko@mail.ru

Гончаров Евгений Владимирович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аспирант ВГТУ, инженер-технолог III категории ЗРД ОАО КБХА

e-mail: gonevg@yandex.ru

Коденцев Сергей Николаевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Кандидат технических наук, старший преподаватель ВГТУ, главный инженер ЗРД ОАО КБХА

S.V. USOV, D.S. SVIRIDENKO, E.V. GONCHAROV, S.N. KODENTSEV

**STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL WATERJET POSSIBILITY
OF PROCESSING MACHINE PARTS AS A FACTOR SCIENTIFIC –
TECHNICAL PROGRESS**

The mechanism of separation of materials waterjet stream of high pressure and ways to improve the quality of surface separation. Given the technological possibilities Waterjet separation of materials of high pressure jet and its comparison with other modern methods of separation.

Keywords: *hydroabrasive separation of metals, a comparison of separation methods, the quality of surface separation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Usov, S.V. Osnovy tehnologii vodoabrazivnoj obrabotki detalej mashin / S.V. Usov, Ju.F. Nazarov, D.S. Sviridenko i dr. – М.о., г. Podol'sk: Slavjanskaja shkola, 2010. – 148с.
2. Smolencev, V.P. Formirovanie poverhnostnogo sloja pri gidroabrazivnom razdelenii metallov s nalozheniem jelektricheskogo polja./ V.P. Smolencev, E.V. Goncharov//Vestnik VGTU, 2011, tom 7, №7 – S.74-77.

Usov Sergei Vadimovch.

Ltd. "Technological system of protective coatings", Moscow

Doctor of Technical Sciences, Professor MGOU, vice-president of "technological system of protective coatings"

Sviridenko Daniel Sergeevich

Moscow State Open University. VS Chernomyrdin, Moscow

Ph.D., dean of the engineering faculty MGOU, assistant professor of "Theoretical Foundations of Mechanical Engineering"

e-mail: d_sviridenko@mail.ru

Goncharov Evgeny Vladimirovich

Voronezh State Technical University, Voronezh

Graduate student VGTU, Engineer III category of KBKhA

e-mail: gonevg@yandex.ru

Kodentsev Sergey Nikolaevich

Voronezh State Technical University, Voronezh

Ph.D., Senior Lecturer VGTU, chief engineer of KBKhA

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 371.261

А.В. МОРОЗОВА

ПРОЦЕДУРА ШКАЛИРОВАНИЯ ОСИ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ СПЕЦИАЛИСТА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

В статье описывается линейная модель оценивания уровня сформированности компетенции выпускника и анализируется проблема шкалирования оси компетенции как компонента анализируемой модели.

Ключевые слова: специалист, компетенция, федеральный государственный образовательный стандарт.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При разработке ООП на основе ФГОС нового поколения возникает проблема оценивания уровня сформированности профессиональных компетенций выпускника как результата ее освоения [1], [2]. С этой целью автором разработана линейная модель оценивания уровня сформированности компетенции, основывающаяся на формализации информационных пространств в рамках федерального государственного образовательного стандарта нового поколения по определенному направлению подготовки специалиста. Применение этой модели требует решения ключевого вопроса о шкалировании оси, характеризующей это информационное пространство и предназначенной для изменения уровня сформированности компетенции специалиста.

АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА

Для каждой компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$, в соответствии с ООП устанавливается несколько уровней сформированности:

- $H_k^{\min}$ - пороговый уровень; характеризует такой уровень сформированности компетенции B_k выпускника, который устанавливает ее минимальное соответствие требованиям ООП по подготовке выпускника к профессиональной деятельности;
- H_k^v - продвинутый уровень; характеризует такой уровень сформированности компетенции B_k выпускника, который констатирует наличие у него устойчивых навыков выполнения требований ООП по подготовке выпускника к профессиональной деятельности;
- H_k^w - высокий уровень; характеризует такой уровень сформированности компетенции B_k выпускника, который показывает наличие высокого уровня знаний теоретико-методологических подходов к решению профессиональных задач, а также практического опыта профессиональной деятельности по профилю ООП.

Значения параметров $H_k^{\min}$, H_k^v и H_k^w определяются вузами самостоятельно в рамках утвержденных ООП. Кроме того, для ряда компетенций ООП устанавливает только значения порогового и высокого уровней.

В этой связи, для p -го объекта, освоившего с уровнем s_{pj} учебную дисциплину A_j , долевой уровень влияния на формирование компетенции B_k составляет $\beta_{jk} \cdot s_{pj}$ (рис. 1).

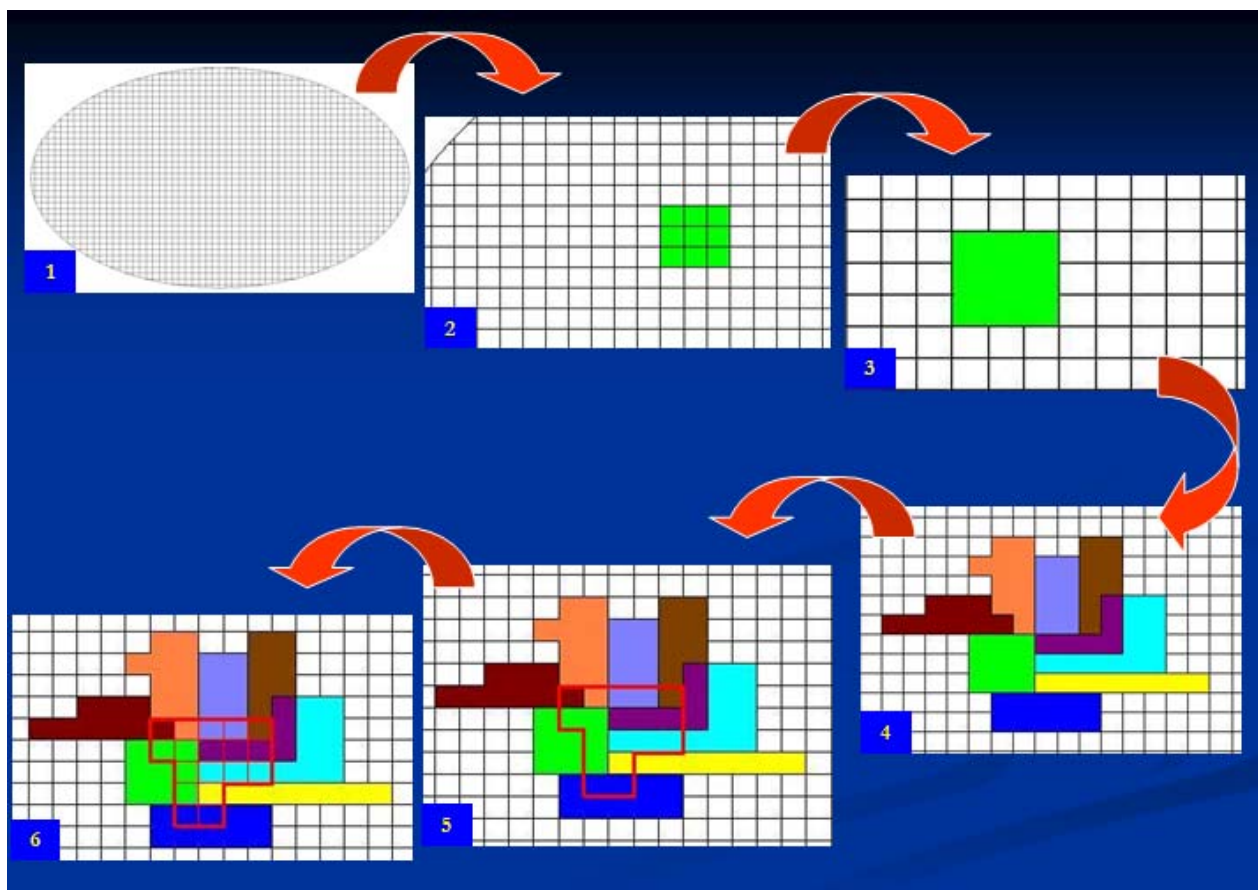


Рисунок 1 – Модель формирования компетенции специалиста B_k посредством долевого влияния уровней освоения подмножества учебных дисциплин A_j ООП, формируемых на базе информационных пространств подмножества дидактических единиц D_i

Если в формировании компетенции B_k участвует подмножество учебных дисциплин $A_{j'}$, $j' = \overline{1:m'}$, то для p -го объекта уровень сформированности H_{pk} компетенции B_k можно охарактеризовать несколькими способами:

- по уровню достижения максимального значения среди всех имеющихся уровней освоения учебных дисциплин $A_{j'} \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$ и оказывающих влияние на уровень сформированности компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$, т.е.:

$$H_{pk} = \max\{s_{pj'k}; j' = \overline{1:m'}\} \quad (1)$$

- по уровню достижения минимального значения среди всех имеющихся уровней освоения учебных дисциплин $A_{j'} \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$ и оказывающих влияние на уровень сформированности компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$, т.е.:

$$H_{pk} = \min\{s_{pj'k}; j' = \overline{1:m'}\} \quad (2)$$

- по уровню достижения среднего значения среди всех имеющихся уровней освоения учебных дисциплин $A_{j'} \subset \{A_j\}$, $j = \overline{1:m}$, $j' = \overline{1:m'}$, скорректированных по степени влияния β_{jk} учебной дисциплины $A_{j'}$ на формирование компетенции B_k , $k = \overline{1:l}$, и оказывающих влияние на уровень сформированности этой компетенции, и рассчитываемый по формуле средней арифметической взвешенной, т.е.:

$$H_{pk} = \frac{\sum_{j'=1}^{m'} \beta_{j'k} \cdot s_{pj'k}}{m'} \quad (3)$$

Если учесть, что для величины H_{pk} устанавливаются пороговый уровень $H_k^{\min}$, продвинутый уровень H_k^v и высокий уровень H_k^w , то можно ввести условный ранг уровневой компетентностной классификации c_{pk} в виде:

$$c_{pk} = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq H_{pk} < H_k^{\min}; \\ 1, & \text{если } H_k^{\min} \leq H_{pk} < H_k^v; \\ 2, & \text{если } H_k^v \leq H_{pk} < H_k^w; \\ 3, & \text{если } H_k^w \leq H_{pk} \leq 1; \end{cases} \quad (4)$$

Условный ранг уровневой компетентностной классификации c_{pk} может использоваться при автоматизации процесса оценивания компетенции B_k специалиста при формировании символьной переменной C_{pk} , описывающей уровень ее сформированности. В этом случае в соответствии с ООП используют следующую уровневую интерпретацию:

если $c_{pk} = 0$, то $C_{pk} =$ «компетенция B_k отсутствует»;

если $c_{pk} = 1$, то $C_{pk} =$ «специалист имеет низкий уровень сформированности компетенции B_k »;

если $c_{pk} = 2$, то $C_{pk} =$ «специалист имеет продвинутый уровень сформированности компетенции B_k »;

если $c_{pk} = 3$, то $C_{pk} =$ «специалист имеет высокий уровень сформированности компетенции B_k ».

В этой связи, имея числовую характеристику H_{pk} уровня сформированности компетенции B_k , а также значения порогового $H_k^{\min}$, продвинутого H_k^v и высокого H_k^w уровней ее сформированности, можно составить геометрическую интерпретацию, представленную на рисунке 2, которая имеет вид линейной модели.

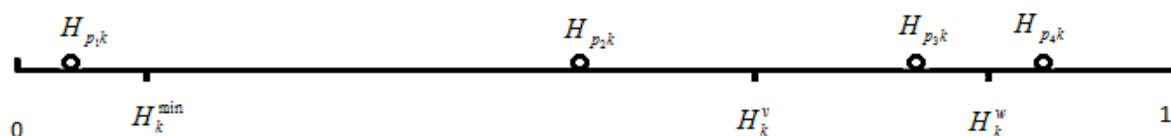


Рисунок 2 – Линейная модель оценивания уровня сформированности компетенции B_k

Из рисунка 2 следует:

H_{p1k} - объект P_1 не компетентен в рамках рассматриваемой ООП;

H_{p2k} - объект P_2 имеет низкий уровень сформированности компетенции B_k ;

H_{p3k} - объект P_3 имеет продвинутый уровень сформированности компетенции B_k ;

H_{p4k} - объект P_4 имеет высокий уровень сформированности компетенции B_k .

При формировании значений системы параметров $H_k^{\min}$, H_k^v и H_k^w и шкалировании оси компетенции B_k целесообразно учитывать следующее. ФГОС направлений подготовки

специалистов не устанавливает систему числовых значений параметров $H_k^{\min}$, H_k^v и H_k^w . Поэтому такая система будет формироваться автономно образовательными учреждениями в рамках ООП на основе экспертных методов.

Особенность реализации ООП в соответствии с ФГОС третьего поколения заключается в том, что, выставив оценку по учебной дисциплине, преподаватель должен оценивать не только знания, умения и навыки студентов, но уровень сформированности компетенций в рамках реализуемой учебной дисциплины. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о преобразовании пятибалльной шкалы оценок по учебным дисциплинам в нормированную шкалу оценивания компетенций специалиста.

Пусть такая зависимость будет представлена в качестве линейной функции $b = f(a)$, где a - оценка уровня сформированности компетенции B по номинальной пятибалльной шкале; b - оценка уровня сформированности компетенции B при использовании нормированной шкалы. В этом случае преобразование номинальной шкалы Oa в нормированную шкалу Ob можно выполнить по формуле:

$$b = \frac{b_{\max} - b_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \cdot (a - a_{\min}) + b_{\min} \quad (5)$$

Если в качестве примера рассмотреть ситуацию, когда для оценивания уровня сформированности компетенций студента в ходе реализации учебной дисциплины A_j , $j = 1:m$, используется традиционная для российской системы профессионального образования пятибалльная система, а модель (9) линейная, то соответствие можно установить посредством следующей формулы:

$$b = \frac{1 - 0}{5 - 2,5} \cdot (a - 2,5) + 0 = \frac{a - 2,5}{2,5} \quad (6)$$

Если учесть, что шкала оценивания уровня сформированности компетенции должна учитывать тот факт, что эксперту предоставляется возможность оценить как наличие уровня сформированности компетенции в интервале, превышающем значение «высокий уровень H_k^w », так и отсутствие компетенции, что соответствует точке на оси компетенции, расположенной ниже точки «пороговый уровень $H_k^{\min}$ », то можно установить соответствие между лингвистической оценкой, традиционной для оценивания уровня освоения содержания учебной дисциплины в системе высшего профессионального образования, традиционной пятибалльной системой оценивания, принятой в системе среднего профессионального образования, а также интервалами номинальной и нормированной шкал, рекомендуемых (в качестве примера) автором для оценивания уровня сформированности компетенции специалиста (табл. 1).

Таблица 1 - Числовые интервалы нормированной и номинальной (по пятибалльной системе) шкал оценивания уровня сформированности компетенции специалиста B_k , $k = \overline{1:l}$, в рамках реализации подсистемы учебных дисциплин $A_{j'}$, $j' = \overline{1:m'}$

Лингвистическая оценка оценивания уровня сформированности компетенции специалиста	Традиционная пятибалльная система оценивания уровня освоения учебной дисциплины	Интервалы номинальной шкалы оценивания уровня сформированности компетенции специалиста	Интервалы нормированной шкалы оценивания уровня сформированности компетенции специалиста
Отлично	5	более 4,5	0,8-1,0
Хорошо	4	4,0-4,5	0,6-0,8
Удовлетворительно	3	3,5-4,0	0,4-0,6
Допустимо	-	3,0-3,5	0,2-0,4
Неудовлетворительно	2	менее 3,0	0,0-0,2

В этом случае для компетенции B_k значения порогового $H_k^{\min}$, продвинутого H_k^v и высокого H_k^w уровней ее сформированности можно принять равными: $\dot{I}_k^{\min} = 3,5$, $\dot{I}_k^v = 4,0$ и $\dot{I}_k^w = 4,5$ по номинальной шкале и $\dot{I}_k^{\min} = 0,4$, $\dot{I}_k^v = 0,6$ и $\dot{I}_k^w = 0,8$ по нормированной шкале.

Так как система значений параметров $H_k^{\min}$, H_k^v и H_k^w формируется автономно образовательным учреждением в рамках реализуемой ООП, то возможны иные подходы к формированию числовых значений системы этих параметров. С социологической точки зрения, образовательные учреждения, формирующие контингент студентов из числа абитуриентов, имеющих высокие баллы по итогам ЕГЭ, будут склонные или к повышению порогового, продвинутого и высокого уровней сформированности компетенции выпускника, или, что более просто реализовать с практической точки зрения, будут повышать уровень сложности содержания учебных дисциплин, формирующих профессиональные компетенции, оставляя при этом предлагаемую авторами данной работы методику формирования числовых значений системы параметров $H_k^{\min}$, H_k^v и H_k^w .

ВЫВОД

Разработка линейной модели оценивания уровня сформированности компетенций специалиста, основанной на введении осей компетенций, характеризующих информационного пространства компетенций в соответствии с ФГОС нового поколения, и также реализация последующей процедуры шкалирования этих осей позволяет решить методологическую проблему оценивания результативности реализации ФГОС нового поколения по направлению подготовки специалиста [3] и является основой для решения проблемы оценивания конкурентоспособности вуза посредством анализа конкурентоспособности его выпускников на рынке труда [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Формирование модели оценивания уровня сформированности компетенций специалиста машиностроительного профиля [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-3(292). – С.127-133.
2. Киричек, А.В. Разработка модели оценивания уровня сформированности кластеров компетенций специалиста машиностроительного профиля [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-4(292). – С.131-137.
3. Киричек, А.В. Моделирование процедуры оценивания уровня социально-профессиональной компетентности специалиста машиностроительного профиля в условиях рынка труда [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-5(292). – С.134-141.
4. Морозова, А.В. Системный подход к формированию стратегических задач повышения конкурентоспособности профильного вуза университетского комплекса [Текст] / А.В. Морозова, Д.Е. Тарасов, И.Е. Ермаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-6(292). – С.142-147.

Морозова Анна Валентиновна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»

Кандидат социологических наук, заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 555524

E-mail: niotiostu@gmail.com

A.V. MOROZOVA

PROCEDURE OF DEVELOPMENT OF THE SCALE FOR THE AXIS OF LINEAR MODEL OF THE ESTIMATION OF THE LEVEL OF THE COMPETENCE OF THE EXPERT OF THE TECHNICAL STRUCTURE

In article the linear model estimation a level to generate the competence of the graduate is described and the problem creation of a scale axes of the competence as component of analyzed model is analyzed.

Keywords: *the specialist, the competence, the federal state educational standard.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kirichek, A.V. Formirovanie modeli ocenivaniya urovnja sformirovannosti kompetencij specialista mashinostroitel'nogo profilja [Tekst] / A.V. Kirichek, A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2-3(292). – S.127-133.
2. Kirichek, A.V. Razrabotka modeli ocenivaniya urovnja sformirovannosti klasterov kompetencij specialista mashinostroitel'nogo profilja [Tekst] / A.V. Kirichek, A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2-4(292). – S.131-137.
3. Kirichek, A.V. Modelirovanie procedury ocenivaniya urovnja social'no-professional'noj kompetentnosti specialista mashinostroitel'nogo profilja v uslovijah rynka truda [Tekst] / A.V. Kirichek, A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2-5(292). – S.134-141.
4. Morozova, A.V. Sistemnyj podhod k formirovaniju strategicheskikh zadach povyshenija konkurentosposobnosti profil'nogo vuza universitetskogo kompleksa [Tekst] / A.V. Morozova, D.E. Tarasov, I.E. Erma-kov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2-6(292). – S.142-147.

Morozova Anna Valentinovna

FGBOU VPO "State university-UNPK"

The candidate of sociological sciences, the deputy director for NIR of Institute of technology of N. N. Polikarpov

Ph.: (4862) 555524

E-mail: niotlostu@gmail.com

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 544.725:687.15

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, А.А. ПАВЛОВСКАЯ

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ КОЛЛОИДНЫХ ПОЛОТНАХ. ЧАСТЬ I. ГИГРОСКОПИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Авторами рассматриваются существующие методы оценки показателей переноса парообразной и жидкой влаги в структуре капиллярно-пористых коллоидных полотен, а также предлагаются собственные методы экспериментальных исследований ряда показателей переноса. Статья состоит из двух частей. В первой рассматриваются методы и подходы к анализу процессов переноса парообразной влаги, во второй – капельной.

Работа выполнена в рамках ГРАНТ № 12-08-97577 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и влагопереноса в структуре капиллярно-пористых коллоидных полотен», поддержанного Администрацией Орловской области.

Ключевые слова: капиллярно-пористые коллоидные полотна, перенос влаги, парциальное давление пара, сорбция.

Исследование процессов переноса парообразной и жидкой влаги в структуре капиллярно-пористых коллоидных полотен является важной фундаментальной задачей, решение которой направлено на расширение знаний в области термодинамики. Прикладное значение задачи заключается в том, что в процессе поглощения влаги наблюдаются изменения теплофизические свойств и структурных характеристик капиллярно-пористых коллоидных полотен. Капиллярно-пористые коллоидные полотна интегрированы с современными техническими и биотехническими системами. Нормоск выделил более 20-ти фундаментальных путей их применения в современной технологии. Поэтому задача прогнозирования динамики теплофизических и структурных показателей капиллярно-пористых коллоидных полотен становится все более значимой [6].

Экспериментальные исследования процессов переноса влаги активно проводятся отечественными и зарубежными исследователями. Теоретической предпосылкой таких исследований является уравнение Лыкова А.В. (1) [4]:

$$\Delta M = c_m M_0 (P_1 - P_2) \quad (1)$$

где c_m – удельная влагоемкость тела, P_1 и P_2 – условный потенциал переноса влаги.

По Лыкову А.В. в гигроскопическом состоянии капиллярно-пористого коллоидного тела, потенциалом переноса влаги является упругость пара, во влажном – условный потенциал влагопереноса (Θ , °М). В то же время общепринятые и стандартные методы исследований предполагают оценивать влагоперенос в гигроскопическом состоянии по косвенным показателям, таким как относительная паропроницаемость (%) и величина влагоотдачи, (г/г), не устанавливая точную связь этих показателей с разностью парциальных давлений в структуре образца и окружающей среде.

Например, стандартный метод (ГОСТ 938.17-70 «Кожа. Метод определения паропроницаемости») предполагает определять показатель паропроницаемости по уменьшению массы жидкости, при ее диффузии через исследуемый образец в окружающую среду [3]. Величина давления пара под образцом соответствует давлению насыщенного пара. Влагосодержание воздуха в окружающей среде не учитывается, что не позволяет определить разность потенциалов переноса через структуру материала.

По ГОСТ 3816-81 «Полотна текстильные. Методы определения гигроскопичности и водоотталкивающих свойств» влагоотдача текстильных материалов оценивается по

динамике массы образца при его последовательном выдерживании в эксикаторах с водой и серной кислотой [2]. Методика исследований не предполагает измерение температуры воздуха в эксикаторах, что существенно затрудняет оценку разности парциальных давлений в обеих средах. Очевидно, что при использовании серной кислоты, относительная влажность воздуха будет стремиться к нулевой отметке.

Согласно закону Фильнея, в эксикаторе с водой, парциальное давление пара в воздухе будет находиться в логарифмической зависимости от его температуры, которая отличается от температуры воздуха в окружающей среде [5]. Можно заключить, что стандартный метод не предполагает оценку разности потенциалов переноса.

По нашему мнению, проведение более точных исследований должно быть основано на определении величины влагопереноса при задаваемой в процессе эксперимента разности парциальных давлений пара.

Эта задача решается в авторской методике исследования величины влагопереноса в капиллярно-пористых коллоидных полотнах [1]. Сущность методики заключается в следующем:

- до начала испытаний исследуемый образец полотна размером 25×25 мм выдерживается в сушильном шкафу при температуре $107 \pm 2^\circ\text{C}$ в течении 2,5 часов, после чего взвешивается с точностью 0,001 г ($m_{\text{сух}}$);

- образец (поз. 1, рис. 1) помещается на фиксирующие перегородки пластикового кольца (поз. 2, рис. 3), которое устанавливается в чашку Петри (поз. 3, рис. 3), дно которой заполнено водой. Чашка закрывается крышкой (поз. 4, рис. 3) и помещается в термостат на время τ от 0,5 до 6 часов, по истечении заданного времени исследуемый образец взвешивается с точностью до 0,001 г ($m_{\text{гигр}}$);

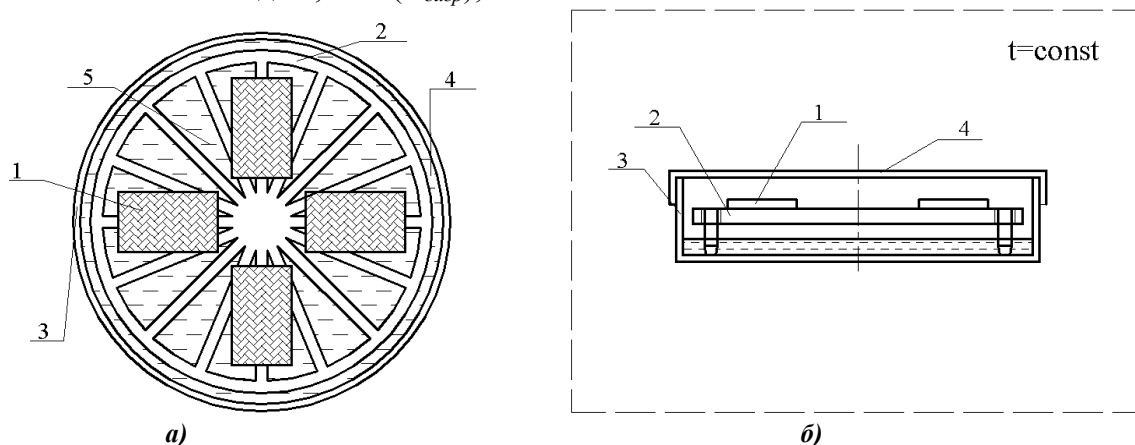


Рисунок 1 – Схема проведения экспериментальных исследований сорбционных свойств

Влагосодержание образца вычисляется по формуле:

$$u_{\text{мс}} = \frac{m_{\text{гигр}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \quad (2)$$

Величина парциального давления водяного пара в структуре образца принимается равной нулю (так как после высушивания, его влагосодержание близко к нулю). Воздух в чашке Петри является насыщенным. Парциальное давление насыщенного воздуха, в зависимости от температуры насыщенного воздуха может быть определено по формуле Фильнея (3) [5]. Учитывая это соотношение, можно записать разность парциальных давлений в воздухе и в структуре образца (4):

$$\lg p = \frac{156 + 8.12t_{\text{нг}}}{236 + t_{\text{нг}}} \quad (3)$$

$$\Delta p = 10^{\frac{156 + 8.12t_{\text{нг}}}{236 + t_{\text{нг}}}} \quad (4)$$

где $t_{\text{нв}}$ – температура насыщенного воздуха, °С.

Графическое представление величины влагосодержания образца от времени выдержки при различной температуре термостата позволяет исследовать динамику процесса сорбции.

Например, на рисунке 2 представлена кривая динамики влагосодержания для хлопчатобумажной ткани полотняного переплетения. Температура насыщенного воздуха в чашке Петри – 50°С. Согласно расчетам, разность парциальных давлений в начальный момент времени: $\Delta p = 92,6$ мм.рт.ст.

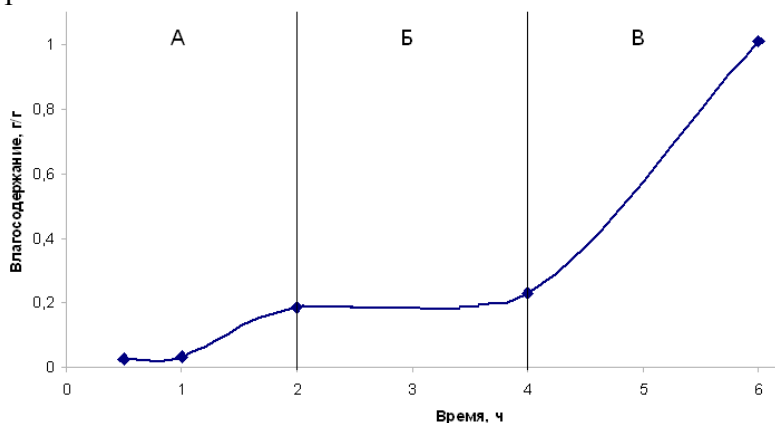


Рисунок 2 – Кривая сорбции хлопчатобумажной ткани

Как видно, кривая изменения влагосодержания может быть разделена на несколько участков:

- на участке А наблюдается постоянный прирост массы образца, вследствие процессов сорбции;
- на участке Б скорость сорбции замедляется, кривая изменения влагосодержания становится полой, на отдельных участках превращаясь в прямую, что объясняется набуханием волокон и изменением микроструктуры системы;
- на участке В прирост массы возобновляется, что объясняется вработыванием в процесс сорбции новой структуры.

Проведение исследований на образцах капиллярно-пористых коллоидных полотен подобной структуры, изготовленных из синтетических волокон позволяет наблюдать иную картину. Так, на рисунке 3 представлена кривая сорбции для полиэфирной ткани полотняного переплетения. Температура насыщенного воздуха и, соответственно разность парциальных давлений пара в начальный момент времени в чашке Петри составляют 50°С, и 92,6 мм.рт.ст.

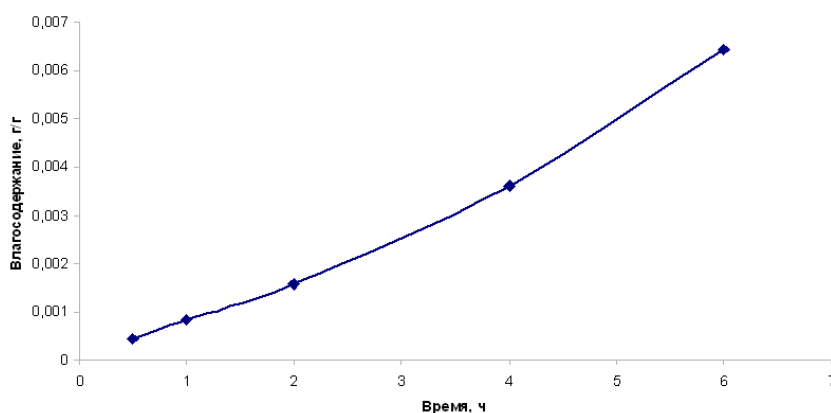


Рисунок 3 – Кривая сорбции полиэфирной ткани

Известно, что при сорбции водяных паров синтетическими волокнами, набухания нитей не происходит. Адсорбированные молекулы накапливаются на поверхности волокон,

глубоко не проникая в их структуру. Поэтому не происходит изменения структурных характеристик, что обуславливает плавную форму кривой сорбции без критических точек.

Проведя измерение для нескольких точек, можно построить кривую изменения влагосодержания от разности парциальных давлений, после чего вычислить коэффициент влагообмена β , г/(м²·Па), по соотношению:

$$\beta = \frac{M}{\Delta p \cdot S} \quad (5)$$

где М – масса адсорбированного пара, г; S – площадь поверхности исследуемого образца, м².

Результаты экспериментальных исследований по методике, разработанной авторами статьи, позволяют точнее прогнозировать динамику гигроскопических свойств капиллярно-пористых коллоидных полотен. Полученные аналитические соотношения и графики могут быть использованы при решении задач использования капиллярно-пористых коллоидных полотен, описанных выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А.В. Экспериментальное исследование сорбционных свойств швейных материалов [Текст] / А.В. Абрамов, М.В. Родичева // Вестник МАНЭБ т.15 №4. 2010, с.170-172.
2. ГОСТ 3816-81 Полотна текстильные. Методы определения гигроскопичности и водоотталкивающих свойств [Текст]/ кол. авторов // ИПК Издательство стандартов - 1981 - 14 с.
3. ГОСТ 938.17-70 Кожа. Метод определения паропроницаемости [Текст]/ кол. авторов // Издательство стандартов - 1970 - 2 с.
4. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков // М. - Знамя - 1968г. - 472с.
5. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. Уч. пособие [Текст] / А.В. Нестеренко // М.: «Высшая школа» - 1971- 460 с.
6. Horrocks, A. R., Anand, S. C. [Text] / A. R. Horrocks, S. C. Anand // Handbook of Technical Textiles. WoodheadPublishing - 2000 - 248 p.

Родичева Маргарита Всеволодовна

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

Абрамов Антон Вячеславович

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»

Телефон (4862) 76-14-39

E-mail bgdgtu@mail.ru

Павловская Алла Александровна

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, A.A. PAVLOVSKAYA

PROCESSES OF TRANSFER OF MOISTURE IN CAPILLARY AND POROUS COLLOIDAL CLOTHS. PART I. HYGROSCOPIC CONDITION

Authors consider existing methods of an assessment of indicators of transfer of vaporous and liquid moisture in structure of capillary and porous colloidal cloths, and also own methods of pilot

studies of a number of indicators of transfer are offered. Article consists of two parts. In the first methods and approaches to the analysis of processes of transfer of vaporous moisture, in the second – drop are considered.

Work is executed in a framework the GRANT No. 12-08-97577 «Theoretical and pilot studies of processes warm and moisture transfer in structure of capillary and porous colloidal cloths», supported by Administration of the Oryol region.

Keywords: *capillary and porous colloidal cloths, moisture transfer, partial vapor pressure, sorption.*

BIBLIOGRAPHY

1. Abramov, A.V. Pilot study of sorption properties of sewing materials [Texts] / A.V. Abramov, M. V. Rodicheva // Messenger IASES v.15 No. 4. 2010, P. 170-172.
2. GOST of 3816-81 Cloth textile. Methods of determination of hygroscopicity and water-repellent properties [Text] / stake. authors/IPK Standards Publishing House - 1981-14 p.
3. GOST 938.17-70 Skin. Definition method paropronitsayemost [Text] / stake. authors // Standards Publishing House - 1970 - 2 p.
4. Lykov, A.V. Theor of Drying [Text] / A.V drying. Lykov // The Banner - 1968г. - 472с.
5. Nesterenko A.V. Bases thermodynami calculation ventilation and air conditioning. . [Text] / A.V Nesterenko // The higher school - 1971 - 460 p.
6. Horrocks, A. R., Anand, S. C. [Text] / A. R. Horrocks, S. C. Anand // Handbook of Technical Textiles. WoodheadPublishing - 2000 - 248 p.

Rodicheva Margarita Vsevolodovna

State university – ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, head of the department «Technology and designing of garments»

Phone (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

Abramov Anton Vyacheslavovich

State university - ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Labor and environmental protection»

Phone (4862) 76-14-39

E-mail bgdgtu@mail.ru

Pavlovskaya Alla Alexandrovna

State university - ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Technology and designing of garments»

Phone (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.054.44: 629.7.05.067

Е.С. СОЛДАТКИНА, В.М. СОЛДАТКИН

АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОГО ДАТЧИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА И ИСТИННОЙ ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ

Рассматриваются принципы построения и алгоритмы обработки информации вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости. Приводятся характеристики первичных информативных сигналов, проводится анализ диапазонов измерения, составляющих и результирующей погрешности каналов аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Ключевые слова: летательный аппарат, аэродинамический угол, истинная воздушная скорость, измерение, вихревой датчик, особенности построения, алгоритмы, рабочие диапазоны, погрешности, анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Полеты большого класса летательных аппаратов (ЛА) осуществляются в пределах атмосферы, где выполнение основных полетных задач связано с пилотированием по вектору истинной воздушной скорости, положение которого в связанной системе координат определяется аэродинамическими углами – углами атаки и скольжения. Широкое использование информации об аэродинамических углах и истинной воздушной скорости при решении задачи обеспечения безопасности и эффективности полета ЛА определяет актуальность расширения арсенала средств ее получения [1].

Принципиальная возможность меньших потерь информации при выделении, преобразовании и обработке частотных первичных информативных сигналов определяет перспективы применения на различных классах ЛА комбинированного вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, принципы построения и формирования первичных информативных сигналов которого рассмотрены в работе [2].

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

На рисунке 1, *а* представлена функциональная схема вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Датчик включает два идентичных тела торможения 1, выполненных в виде клинообразных пирамид, на поверхности которых размещены приемники 2 для забора пульсаций давления вблизи тел. Клиновидные пирамиды располагаются на одной оси друг над другом. Для обеспечения измерения в трехмерном набегающем воздушном потоке и устранения влияния другого аэродинамического угла β вектора истинной воздушной скорости ЛА перпендикулярно общей оси клиновидных пирамид устанавливаются струевыпрямители, выполненные в виде тонких плоских дисков, расположенных на верхних и нижних основаниях клиновидных пирамид, как показано на рисунке 1, *б*. Приемники 2 для забора пульсаций давления связаны с преобразователями давлений или перепадов давлений 3, частоты выходных сигналов ε_1 и ε_2 которых равны частотам f_1 и f_2 вихреобразования соответствующих вихрей дорожек Кармана за телами торможения (генераторами вихрей) 1. Электроизмерительные схемы 4, обрабатывая сигналы ε_1 и ε_2 , формируют выходные электрические сигналы U_1 и U_2 . Последние с помощью схемы 5 преобразуются в последовательности нормированных по амплитуде импульсов с частотами f_1 и f_2 , которые поступают в устройство обработки 6, на выходе которого формируются выходные сигналы α и V_B по измеряемым аэродинамическому углу α и истинной воздушной скорости V .

Таким образом, измеряя частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными пирамидами в измерительных каналах вихревого датчика определяются аэродинамический угол и истинная воздушная скорость летательного аппарата.

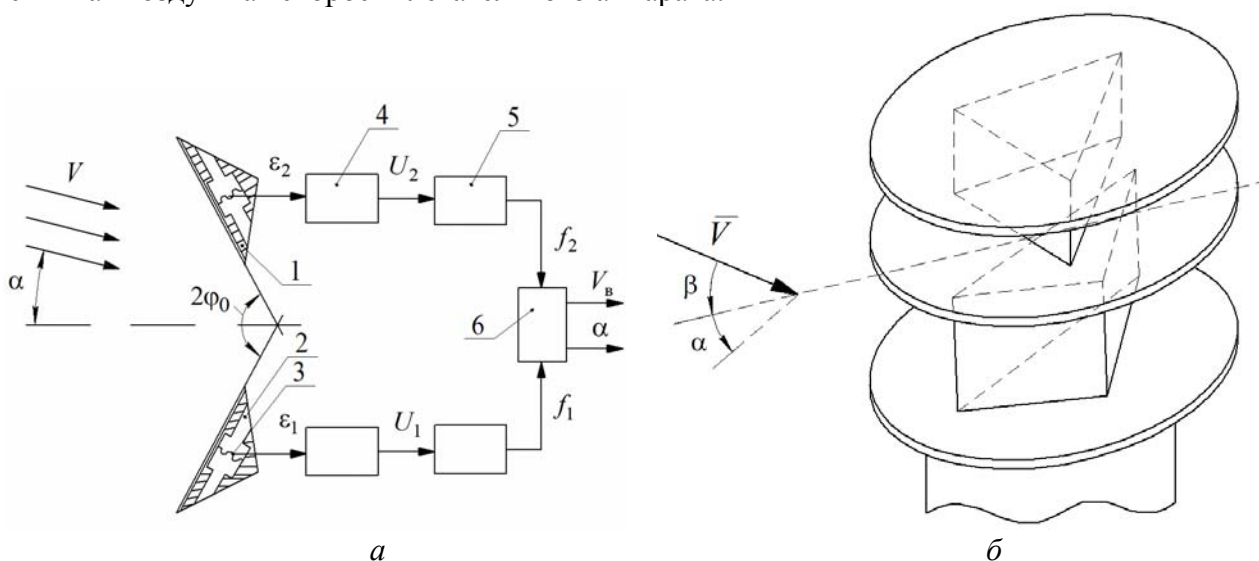


Рисунок 1 – Функциональная схема (а) и выполнение приемника потока (б) вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости

Аналитические зависимости для определения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости V_B имеют вид [2]:

$$\alpha = \arctg \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2}, \quad V_B = \frac{l}{\sqrt{2Sh}} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}, \quad (1)$$

где Sh – число Струхали (для клиновидных пирамид $Sh = 0,165 \dots 0,18$); l – длина рабочего основания клиновидных пирамид.

АНАЛИЗ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА И ИСТИННОЙ ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ

Как показано в работе [3], устойчивое вихреобразование за клиновидными пирамидами обеспечивается при изменении углового положения $\varphi = \varphi_0 + \alpha$ набегающего воздушного потока в диапазоне $20^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. Поэтому диапазон измерения аэродинамического угла α будет определяться соотношением

$$\varphi_0 + \alpha = 90^\circ - 20^\circ. \quad (2)$$

При $\varphi_0 = 45^\circ$ диапазоны измерения аэродинамического угла вихревого датчика определяется неравенством $-25^\circ \leq \alpha \leq +25^\circ$. При установке вихревого датчика путем смещения его оси относительно положения продольной оси летательного аппарата можно обеспечить несимметричный диапазон измерения аэродинамического угла, например $-15^\circ \leq \alpha \leq +35^\circ$.

Так как устойчивое вихреобразование за клиновидными пирамидами обеспечивается в диапазоне чисел Рейнольдса $10^3 < Re < 1,6 \cdot 10^5$ [3], то минимальное V_{Bmin} и максимальное V_{Bmax} значение измеряемой истинной воздушной скорости вихревого датчика будут определяться соотношениями

$$V_{Bmin} > \frac{\nu_0}{l} 10^3; \quad V_{Bmax} < \frac{\nu_{H_{max}}}{l} 1,6 \cdot 10^5, \quad (3)$$

где ν_0 и $\nu_{H_{max}}$ – кинематическая вязкость воздуха вблизи Земли и на максимальной высоте полета H_{max} .

Для значений $l = 20 \text{ мм} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $v_0 = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $H_{\max} = 11000 \text{ м}$,
 $v_{H_{\max}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, получим

$$V_{B\min} > \frac{1,46 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3}} 10^3 = 7,3 \text{ м/с (26,3 км/ч)};$$

$$V_{B\max} < \frac{3,9 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3}} 1,6 \cdot 10^5 = 321 \text{ м/с (1123 км/ч)}.$$

Тогда диапазон измерения истинной воздушной скорости вихревого датчика будет определяться неравенством

$$7,3 \text{ м/с (26,3 км/ч)} < V_B < 321 \text{ м/с (1123 км/ч)},$$

например $30 \text{ км/ч} \leq V_B \leq 1120 \text{ км/ч}$.

Следовательно, объектом применения вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости являются дозвуковыми летательные аппараты.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАТИВНЫХ СИГНАЛОВ И ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ

Как показано в работе [3], для клиновидной пирамиды амплитуду пульсаций давления вблизи тела торможения (генераторов вихрей) можно оценить как

$$P_m \approx 0,04\rho V^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность набегающего потока воздуха.

Последнее выражение определяет требования, предъявляемые к порогу чувствительности и рабочему диапазону преобразователя пульсаций давления за телами торможения и в вихревой дорожке Кармана в электрические сигналы, удобные для последующей обработки в измерительных каналах вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

В таблице 1 приведены значения амплитуды пульсаций давления P_m за генераторами вихрей для различных скоростей V набегающего воздушного потока, вычисленные при нормальных окружающих условиях.

Таблица 1 – Значения амплитуды пульсаций давления

V , км/ч	26,3	50	100	200	400	800	1000	1123
m , Па	2,6	9,5	38	152	608,4	2433	3997	5040

Проведем расчет диапазона изменения частот вихреобразования f_1 и f_2 вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости при следующих значениях конструктивных параметров генераторов вихрей: длина основания клиновидных пирамид $l = 20 \text{ мм}$ ($20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), угол между основаниями клиновидных пирамид $\varphi_0 = 90^\circ$.

При выбранных конструктивных параметрах генераторов вихрей частоты вихреобразования за телами торможения будут определяться соотношениями [2]:

$$f_1 = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 + \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha + \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha + \sin \alpha};$$

$$f_2 = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 - \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha - \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha - \sin \alpha}. \quad (4)$$

В таблице 2 приведены значения частот вихреобразования f_1 и f_2 при изменении аэродинамического угла в диапазоне от -15° до $+35^\circ$ и воздушной скорости, изменяющейся в диапазоне от $V_{\min} = 30 \text{ км/ч}$ до $V_{\max} = 1100 \text{ км/ч}$ (при $Sh = 0,165$).

Таблица 2 – Значения частот вихреобразования

α	-15°	0	+35°	-15°	0	+35°
	f_1 , Гц			f_2 , Гц		
$V_{\min}$	135,98	96,54	69,95	79,78	96,54	402,3
$V_{\max}$	5004,2	3553	2574,6	2937	3553	14804

Таким образом, в рабочих диапазонах изменения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости частоты вихреобразования за генераторами вихрей изменяются в интервале от $f_{\min} = 70$ Гц до $f_{\max} = 15000$ Гц.

Рабочие диапазоны амплитуды P_m и частот f_1 и f_2 пульсаций давления за генераторами вихрей являются исходными при выборе преобразователя пульсаций давлений вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Как показывает анализ, по габаритным размерам, «диапазонам» регистрируемых рабочих частот и амплитуд пульсаций давления и другим техническим характеристикам в вихревом датчике аэродинамического угла и истинной воздушной скорости можно использовать электретные преобразователи пульсаций давления – электретные микрофоны [4, 5].

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Погрешности вихревого датчика аэродинамического угла и воздушной скорости в зависимости от причин их вызывающих можно разделить на инструментальные и методические.

Инструментальные погрешности вихревого датчика вызываются технологическим разбросом конструктивных параметров (характерного размера l) генераторов вихрей, неточностью выдерживания угла φ_0 расположения поверхностей генераторов вихрей при изготовлении датчика, погрешностью установки продольной оси датчика относительно продольной оси самолета, а также изменением характерных размеров генераторов вихрей при изменении температуры окружающей среды за счет линейного расширения (сжатия). К инструментальным составляющим погрешности относятся также погрешность канала формирования и регистрации частот вихреобразования за генераторами вихрей и погрешность устройства обработки информации и формирования выходных сигналов по аэродинамическому углу и воздушной скорости.

Проведем анализ основных составляющих погрешности вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Так как выделение, преобразование и обработку частотных информативных сигналов можно обеспечить с достаточно высокой точностью, то доминирующая часть инструментальных погрешностей измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости вихревого датчика будет определяться технологическим разбросом (допуском) $\pm \Delta l$ характерного размера l клиновидных пирамид.

Приращения Δf_1 , Δf_2 частот f_1 , f_2 , обусловленные технологическим допуском $\pm \Delta l$, можно определить как

$$\Delta f_1 = \sqrt{2} \frac{Sh}{\pm \Delta l} V_B \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha}; \quad \Delta f_2 = \sqrt{2} \frac{Sh}{\pm \Delta l} V_B \frac{1}{\cos \alpha - \sin \alpha}. \quad (5)$$

При этом максимальные отклонения частот вихреобразования будут иметь место, когда размер одного генератора вихрей, например $l_1 = l + \Delta l$, а другого $l_2 = l - \Delta l$. Тогда расчетные значения инструментальных погрешностей измерения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости V_B будут определяться соотношениями

$$\Delta \alpha_{\max} = \arctg \frac{(f_2 + \Delta f_2) - (f_1 - \Delta f_1)}{(f_1 - \Delta f_1) + (f_2 - \Delta f_2)} - \arctg \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2};$$

$$\Delta V_{B \max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{l + \Delta l}{Sh} \frac{(f_1 + \Delta f_1)(f_2 + \Delta f_2)}{\sqrt{(f_1 - \Delta f_1)^2 + (f_2 + \Delta f_2)^2}} - \frac{l}{Sh} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} \right]. \quad (6)$$

В таблице 3 приведены расчетные значения инструментальных погрешностей $\Delta\alpha_{\max}$ и $\Delta V_{\max}$ каналов аэродинамического угла и истинной воздушной скорости вихревого датчика при минимальной $V_{\min}$ и максимальной $V_{\max}$ воздушной скорости для характерных значений аэродинамического угла $\alpha = -15^\circ$, $\alpha = 0$, $\alpha = 35^\circ$.

Таблица 3 – Расчетные значения инструментальных погрешностей

α	$\Delta\alpha_{\max}$, угл.град			$\Delta V_{\max}$, км/ч		
	-15°	0	$+35^\circ$	-15°	0	$+35^\circ$
$V_{\min} = 30$ км/ч	-0,03	-0,04	-0,08	-0,24	-0,26	-0,37
$V_{\max} = 1100$ км/ч	-0,13	0,01	0,09	-0,33	-1,2	-2,8

Таким образом, в рабочих диапазонах скоростей полета и изменения аэродинамического угла максимальное значение инструментальной погрешности вихревого датчика, обусловленное технологическим разбросом характерного размера генераторов вихрей, по каналу истинной воздушной скорости не превышает $\Delta V_{\max} = \pm 2,8$ км/ч, по каналу аэродинамического угла не превышает значения $\Delta\alpha_{\max} = \pm 0,13^\circ$.

При выборе материала генераторов вихрей с малым коэффициентом температурного расширения, например сплав ЭИ-474, влиянием изменения температуры окружающей среды на изменение характерного размера генераторов вихрей можно пренебречь.

Важной составляющей инструментальной погрешности является погрешность, обусловленная технологическим разбросом $\pm\Delta\phi_0$ на углы расположения рабочих поверхностей генераторов вихрей относительно продольной оси датчика, совпадающей с направлением набегающего воздушного потока.

Опыт разработки датчика аэродинамических углов показывает [1], что технологический допуск на угол установки генераторов вихрей назначается равным $\pm\Delta\phi_0 = 0,05^\circ$. Это приводит к дополнительной погрешности $\Delta\alpha_{\phi_0}$ по каналу аэродинамического угла, не превышающую $\Delta\alpha_{\phi_0} = \pm 0,05^\circ$, при этом этот технологический разброс $\Delta\phi_0$ практически не оказывает влияния на инструментальную погрешность определения истинной воздушной скорости.

Другой по важности является инструментальная погрешность, обусловленная точностью выделения и формирования частот вихреобразования с использованием электретных преобразователей.

Из-за отсутствия в литературе сведений о погрешности электретных преобразователей пульсаций давления применительно к задаче выделения и преобразования частот вихреобразования принимаем, что погрешности $\Delta\alpha_{\Delta f}$ и $\Delta V_{\Delta f}$ не превышают $\pm 0,1\%$ от диапазона измерения.

Следующей по значимости инструментальной погрешностью вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости является погрешность устройства обработки информации, в качестве которого используется микропроцессорная система. Опыт использования современных микропроцессорных устройств обработки показывает [6], что их инструментальные погрешности $\Delta\alpha_{\text{обр}}$ и $\Delta V_{\text{обр}}$ не превышают $\pm 0,05\%$ от диапазона измерения истинной воздушной скорости и аэродинамического угла.

Характерной методической погрешностью вихревых датчиков является погрешность, обусловленная эффектом «замирания» вихрей Кармана, то есть временного пропадания импульсов давления за генераторами вихрей. Физическая причина такого эффекта «замирания» (пропадания импульсов давления за генераторами вихрей), пока не установлена. При этом вероятность «замирания» вихрей одновременно за обоими генераторами вихрей весьма мала. Поэтому при появлении эффекта «замирания» запоминается последнее значение частоты «застывшего» генератора вихрей и выходные сигналы по аэродинамическому углу и истин-

ной воздушной скорости формируются по изменению частоты вихрей другого генератора. Следует отметить, что погрешности $\Delta\alpha_{\text{проп}}$ и $\Delta V_{\text{проп}}$, вызываемые эффектом «замирания» носят динамический характер. Принимаем, что при частотах вихреобразования в диапазоне от 70 Гц до 15000 Гц, которые являются рабочими для разрабатываемого вихревого датчика аэродинамического угла и воздушной скорости, погрешности, обусловленные эффектом «замирания», то есть пропадаания пульсаций давления за генераторами вихрей не превышают $\pm 0,2\%$ от диапазона измерения.

Тогда, с учетом того, что рассмотренные составляющие погрешности не коррелированы между собой, а вероятность максимальных значений составляющих погрешностей одного знака достаточно мала, результирующие погрешности вихревого датчика будем оценивать через среднеквадратические значения погрешностей каналов аэродинамического угла и воздушной скорости.

По каналу воздушной скорости среднеквадратическую погрешность $\sigma_{\Delta V}$ вихревого датчика определим как

$$\sigma_{\Delta V} = \sqrt{\Delta V_{\text{max}}^2 + \Delta V_{\Delta f}^2 + \Delta V_{\text{обр}}^2 + \Delta V_{\text{проп}}^2}. \quad (7)$$

Подставляя численные значения составляющих, получим

$$\sigma_{\Delta V} = \sqrt{2,8^2 + \left[\frac{0,1}{100}(1100 - 30)\right]^2 + \left[\frac{0,05}{100}(1100 - 30)\right]^2 + \left[\frac{0,2}{100}(1100 - 30)\right]^2} = 3,7 \text{ км/ч.}$$

По каналу аэродинамического угла среднеквадратическая погрешность будет равна

$$\sigma_{\Delta\alpha} = \sqrt{\Delta\alpha_{\text{max}}^2 + \Delta\alpha_{\varphi_0}^2 + \Delta\alpha_{\Delta f}^2 + \Delta\alpha_{\text{обр}}^2 + \Delta\alpha_{\text{проп}}^2} \quad (8)$$

или

$$\sigma_{\Delta\alpha} = \sqrt{0,13^2 + \left[\frac{0,1}{100}(35 - (-15))\right]^2 + \left[\frac{0,05}{100}(35 - (-15))\right]^2 + \left[\frac{0,05}{100}(35 - (-15))\right]^2 + \left[\frac{0,2}{100}(35 - (-15))\right]^2} = 0,147^\circ.$$

Таким образом, среднеквадратические погрешности вихревого датчика аэродинамического угла и воздушной скорости в рабочих диапазонах измерения не превышают значений $\sigma_{\Delta V} = 3,7$ км/ч и $\sigma_{\Delta\alpha} = 0,15^\circ$, что соответствует современным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы раскрывают методику системотехнического проектирования вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости на этапе технического предложения и эскизного проекта, которая может быть использована при разработке вариантов датчика для различного класса летательных аппаратов. При этом, одновременное получение информации по двум параметрам вектора истинной воздушной скорости непосредственно в цифровой форме, отсутствие влияния на точность измерения изменения характера обтекания клиновидных пирамид при различных скоростях набегающего воздушного потока, стабильность тарировочных зависимостей в широком диапазоне скоростей и высот полета, отсутствие подвижных элементов в зоне набегающего воздушного потока и в датчике в целом определяют перспективы применения вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости на различных дозвуковых летательных аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
2. Солдаткин, В.М. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / В.М.

Солдаткин, Е.С. Солдаткина // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. – №4. – С. 56-59.

3. Блохинцев, Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д.И. Блохинцев. – М.: Гостехиздат, 1946. – 168 с.

4. Микрофоны. Описание. Характеристика. Цоколевка. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ra4a.narod.ru/Spravka4/d54.htm>.

5. М4-А2 «Сосна» - микрофон электретный – Микрофоны – Акустические компоненты. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tec.org.ru/board/14-1-0-464>.

6. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход: пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

Солдаткина Елена Сергеевна

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

Студентка специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы»

Тел. +7(8432) 236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

Солдаткин Владимир Михайлович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел. +7(8432) 236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

E.S. SOLDATKINA, V.M. SOLDATKIN

ANALYSIS OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE VORTEX SENSOR OF THE AERODYNAMIC CORNER AND TRUE AIR SPEED

The principles of construction and algorithms of information processing of the vortex sensor of an aerodynamic corner and true air speed are considered. Characteristics of primary informative signals are provided, the analysis of ranges of measurement, components and a resultant error of channels of an aerodynamic corner and true air speed is carried out.

Keywords: aircraft, aerodynamic corner, true air speed, measurement, vortex sensor, features of construction, algorithms, working ranges, errors, analysis.

BIBLIOGRAPHY

1. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2001. – 448 s.

2. Soldatkin, V.M. Vihrevoj datchik ajerodinamicheskogo ugla i istinnoj vozdushnoj skorosti / V.M. Soldatkin, E.S. Soldatkina // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2012. – №4. – S. 56-59.

3. Blohincev, D.I. Akustika neodnorodnoj dvizhushhejsja sredy / D.I. Blohincev. – М.: Gostehizdat, 1946. – 168 s.

4. Mikrofony. Opisanie. Harakteristika. Cokolevka. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ra4a.narod.ru/Spravka4/d54.htm>.

5. М4-А2 «Сосна» - mikrofon jelektretnyj – Mikrofony – Akusticheskie komponenty. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://tec.org.ru/board/14-1-0-464>.

6. Ajficher, Je. Cifrovaja obrabotka signalov: prakticheskij podhod: per. s angl. / Je. Ajficher, B. Dzhervis. – М.: Izd. dom «Vil'jams», 2004. – 992 s.

Soldatkina Elena Sergeevna

The Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Student of the specialty "Aviation Devices and Measuring Computer Systems"

Ph. +7 (843) 236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

Soldatkin Vladimir Mihaylovich

The Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Ph. Dr., professor, head of the department "Devices and information-measuring systems"

Ph. +7 (8432) 236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

А.И. НЕЗНАНОВ, В.Н. ЕСИПОВ

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯТНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрена математическая модель гидроакустического маятникового датчика уровня железнодорожного пути с амплитудным методом съема информации, приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: датчик, математическая модель, экспериментальные данные.

В связи с постоянным ростом грузо- и пассажирооборота на железнодорожном транспорте и увеличением скорости движения составов все время повышаются требования к состоянию железнодорожного пути и в частности к его поперечной горизонтальности. Негоризонтальность, выраженная в превышении уровня рельс одна над другой приводит, как правило, к повышенному уровню шума и, следовательно, дискомфорту пассажиров при движении поездов, а также к преждевременному износу их ходовых частей. Таким образом, задача поддержания исправного состояния пути является очень важной.

Для ее решения необходимо производить систематический контроль и восстановление железнодорожного пути. Восстановление пути осуществляется выправочно-подбивными машинами. При этом качество работы машины напрямую определяется измерительным прибором, формирующим сигнал, пропорциональный неровности пути.

В настоящее время базовым прибором, которым комплектуются выправочно-подбивные машины, является прибор ELT 133.00 фирмы «Plasser&Theurer» (Австрия). Основными недостатками указанного прибора являются большие габариты (350×145×415 мм) и масса (30 кг), погрешность АЧХ 25 % и фазовое запаздывание 45° при максимальной частоте измеряемого угла. В Тульском государственном университете были разработаны средства измерения, воспроизводящие принцип построения указанного прибора на отечественной элементной базе, характеристики которых были аналогичны австрийскому прибору [1]. Таким образом, разработка датчиков негоризонтальности на опережающем техническом уровне является весьма актуальной задачей.

Одним из путей улучшения технических характеристик датчиков уровня является использование механических маятников, помещенных в полость, полностью заполненную жидкостью. Проблема съема информации может быть решена с помощью ультразвуковых методов измерения.

В результате проведения исследований разработаны принципы построения гидроакустических датчиков контроля уровня негоризонтальности (рис. 1), их макетные образцы и проведены экспериментальные исследования, которые показывают перспективность данного направления [2]. Информативным параметром таких датчиков является амплитуда электрического выходного сигнала.

Для проектирования подобных датчиков необходимо иметь математические модели их статических характеристик. В отмеченной ранее работе [2] приводится следующее выражение для статической характеристики таких датчиков:

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi} K_{\text{дат}} K_{\text{отр}} K_{\text{про}} \left(\cos \gamma + \cos^2 \gamma \right) (\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi), \quad (1)$$

где $\gamma = \arcsin(c_2/c_1 \sin 2\alpha)$ и $K_{\text{про}}$ – угол преломления ультразвуковой волны и коэффициент прохождения ее через диск, разделяющий пьезопреобразователь и жидкость; c_1 и c_2 – соот-

ветственно скорости звука в жидкости и материале диска; $\varphi = \arcsin\left(\frac{L \cos \gamma}{R(\cos \gamma + 1)}\right)$; $K_{\text{дат}}$ – постоянная, определяемая параметрами пьезокерамики и датчика; $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения ультразвука от пластины; R – радиус пьезопреобразователя; L – смещение фронта волны относительно центра пьезоприемника; α – угол негоризонтальности.

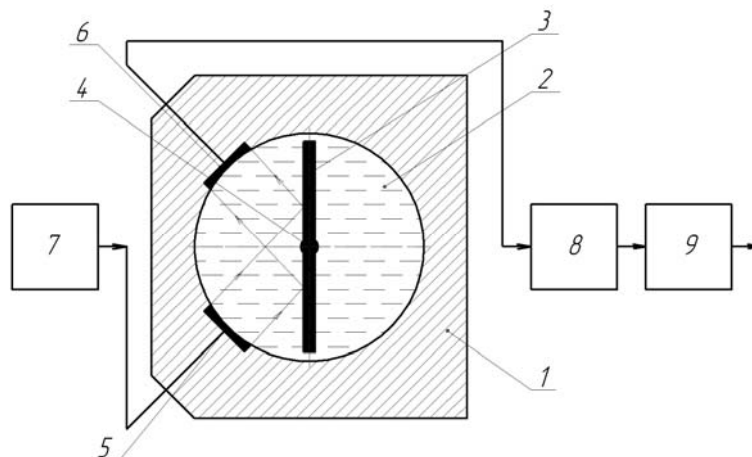


Рисунок 1 – Обобщенная принципиальная схема датчика
 1 – корпус; 2 – цилиндрическая камера, заполненная жидкостью;
 3 – маятниковая пластина; 4 – подвес; 5 – излучатель ультразвука;
 6 – приемник ультразвука; 7 – генератор; 8 – согласующее устройство;
 9 – амплитудный детектор

Выражение (1) применять на практике затруднительно, поскольку расчеты в соответствии с этой моделью показывают, что датчик с цилиндрической камерой диаметром 28 мм и пьезоэлементами 10×1 должен иметь диапазон преобразования около 10°, с камерой 60 мм и пьезоэлементами 10×1 около 8°, с камерой 60 мм и пьезоэлементами 18×1,4 около 12°, с камерой 60 мм и пьезоэлементами 6×0,74 около 5°. Все эти числа говорят о существенном расхождении с экспериментальными данными и, следовательно, плохой работоспособности указанной модели.

Математическая модель статической характеристики датчика уровня в соответствии с выражением (1) не учитывает наклонного падения ультразвуковой волны на пьезоэлемент. Чтобы понять физику данного процесса рассмотрим распространения ультразвуковой волны в камере датчика (рис. 2).

При повороте корпуса датчика на угол α , равный углу негоризонтальности железнодорожного пути, происходит смещение направления ультразвуковой волны на угол α и смещение центра фронта падающей на пьезоприемник ультразвуковой волны относительно его центра на величину $L(\alpha) = r \cdot \operatorname{tg}(2\alpha)$, где r – радиус цилиндрической камеры датчика. Вследствие наклонного падения ультразвуковой волны отдельные участки пьезодиска возбуждаются с различными фазами, вследствие чего элементарная площадка dS пьезоэлемента генерирует заряд, равный:

$$dQ = K \cdot p_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot dS, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности, учитывающий преобразование электрической энергии генератора в энергию ультразвуковой волны на пьезоизлучателе и преобразование давления ультразвука в заряд на пьезоприемнике, p_m – амплитуда ультразвукового давления, ω – круговая частота ультразвука, $\varphi = 2\pi \cdot (x \cdot \sin(2\alpha)/\lambda)$ – фаза ультразвуковой волны вдоль оси x по поверхности пьезоэлемента, λ – длина волны ультразвука в жидкости, заполняющей цилиндрическую камеру датчика.

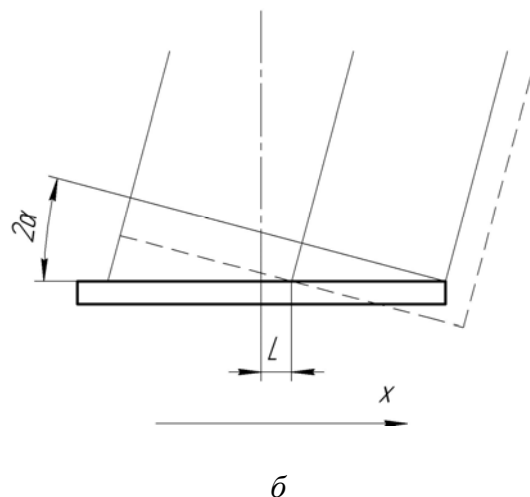
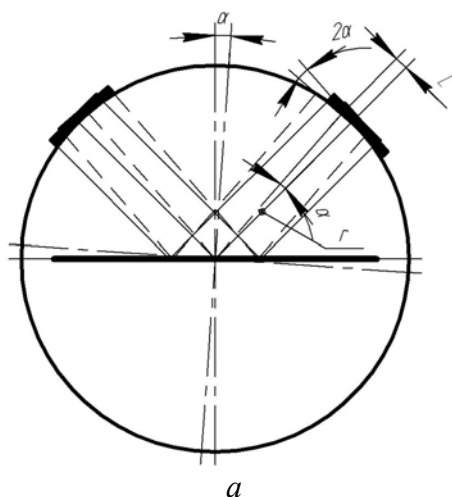
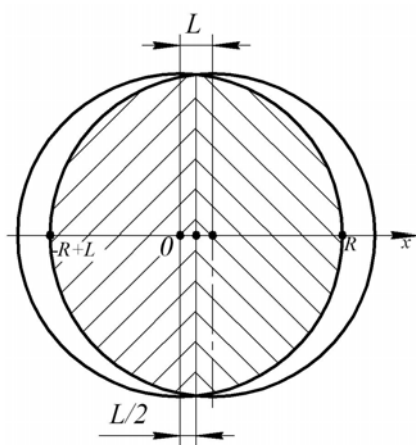


Рисунок 2 – Распространение ультразвуковой волны в камере гидроакустического датчика
а – отражение от маятниковой пластины; б – наклонное падение на пьезодиск



В соответствии с рисунком 3 можно записать:

$$U = \frac{1}{C_{П.Э.}} \int_S dQ = K_{дат} K_{отр} \cdot \int_S \sin(\omega t + \varphi) \cdot dS =$$

$$= K_{дат} K_{отр} \cdot \int_{-R+L}^{L/2} \sqrt{R^2 - (x-L)^2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi\right) dx +$$

$$+ K_{дат} K_{отр} \cdot \int_{L/2}^R \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi\right) dx, \quad (3)$$

где $C_{П.Э.}$ – емкость пьезодиска.

Рисунок 3 – Перекрывание поверхности пьезоэлемента фронтом падающей ультразвуковой волны

Напряжение пьезоприемника, приведенное к максимуму описывается выражением:

$$U_{пр} / U_{пр max} = \frac{1}{\pi R^2} \int_{-R+L}^{L/2} \sqrt{R^2 - (x-L)^2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi\right) dx +$$

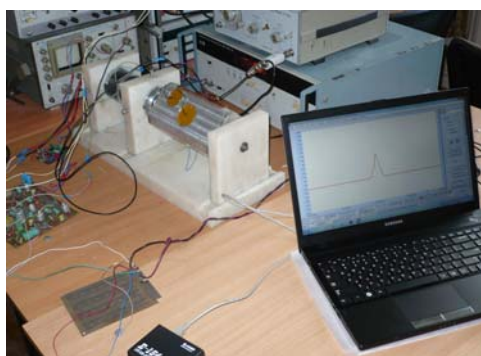
$$+ \frac{1}{\pi R^2} \int_{L/2}^R \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi\right) dx \approx 2 \cdot \sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}} \cdot \frac{J_1\left(K \cdot \left(R - \frac{L}{2}\right)\right)}{K \cdot R} \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $K = \frac{2\pi \sin(2\alpha)}{\lambda}$, J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Таким образом, функция преобразования гидроакустического датчика уровня с амплитудным съемом информации описывается выражением:

$$f(\alpha) = 2K_{дат} K_{отр} \cdot \sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}} \cdot \frac{J_1\left(K \cdot \left(R - \frac{L}{2}\right)\right)}{K \cdot R}. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования опытных образцов датчиков проводились на специальном стенде, который включает в себя генератор синусоидального сигнала ультразвуковой частоты ГЗ-112/1, электрический мотор-редуктор IG71GM 02 TYPE (1/543), обеспечивающий вращение датчика на 360° с угловой скоростью около 2,5 град/с, амплитудный детектор, модуль сбора данных E-154 фирмы L-CARD и ноутбук (рис. 4).



а



б

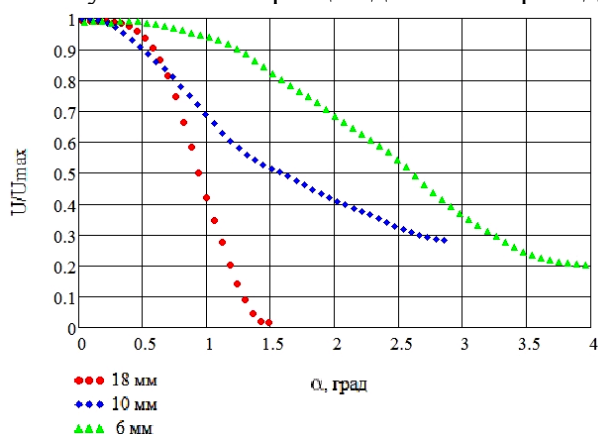
Рисунок 4 – Стенд исследования статической характеристики датчика уровня с амплитудным съемом

а – датчик с цилиндрической камерой диаметром 60 мм;

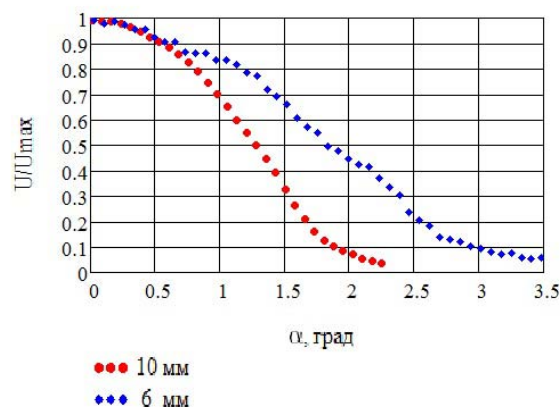
б – датчик с цилиндрической камерой диаметром 28 мм

Шаг дискретизации по углу определяется угловой скоростью вращения датчика и частотой дискретизации модуля сбора данных. Так как хорошему состоянию пути соответствует допустимая негоризонтальность $\pm 4,6$ угл. мин., то частота дискретизации АЦП была выбрана равной 183 Гц, что соответствует шагу дискретизации по углу ± 1 угл. мин.

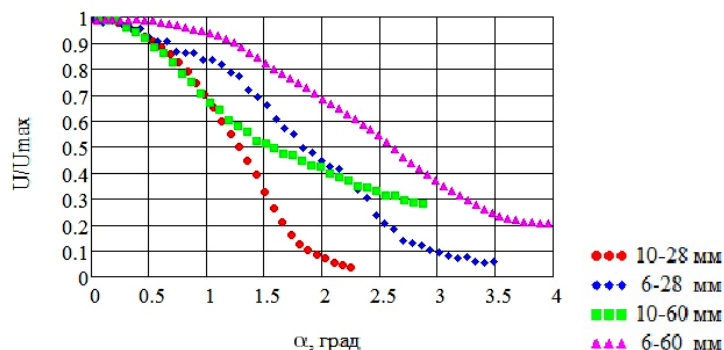
Исследовались два опытных образца датчика: с размером цилиндрической камеры 60 мм и 28 мм. При этом в качестве излучателей и приемников ультразвука использовались три типа дисков из пьезокерамики ЦТС-19: 1) $18 \times 1,4$ мм, 2) 10×1 мм, 3) $6 \times 0,74$ мм. Полученные в ходе экспериментальных исследований нормированные к максимальному выходному сигналу, который возникает при нулевом угле негоризонтальности, статические характеристики указанных образцов датчиков приведены на рисунке 5.



а



б



в

Рисунок 5 – Статические характеристики датчика уровня

а – с цилиндрической камерой диаметром

60 мм с пьезодисками диаметрами 18 мм, 10 мм и 6 мм; б – с цилиндрической камерой диаметром

28 мм с пьезодисками диаметром 6 мм и 10 мм; в – с цилиндрической камерой диаметром

28 мм и 60 мм с пьезодисками диаметрами 6 мм и 10 мм

Анализируя приведенные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что диапазон измерений и чувствительность датчиков определяется в основном размером применяемых пьезоэлементов. В частности, пьезоэлемент $18 \times 1,4$ обеспечивает максимальную чувствительность, а пьезоэлемент $6 \times 0,74$ обеспечивает максимальный диапазон измерений.

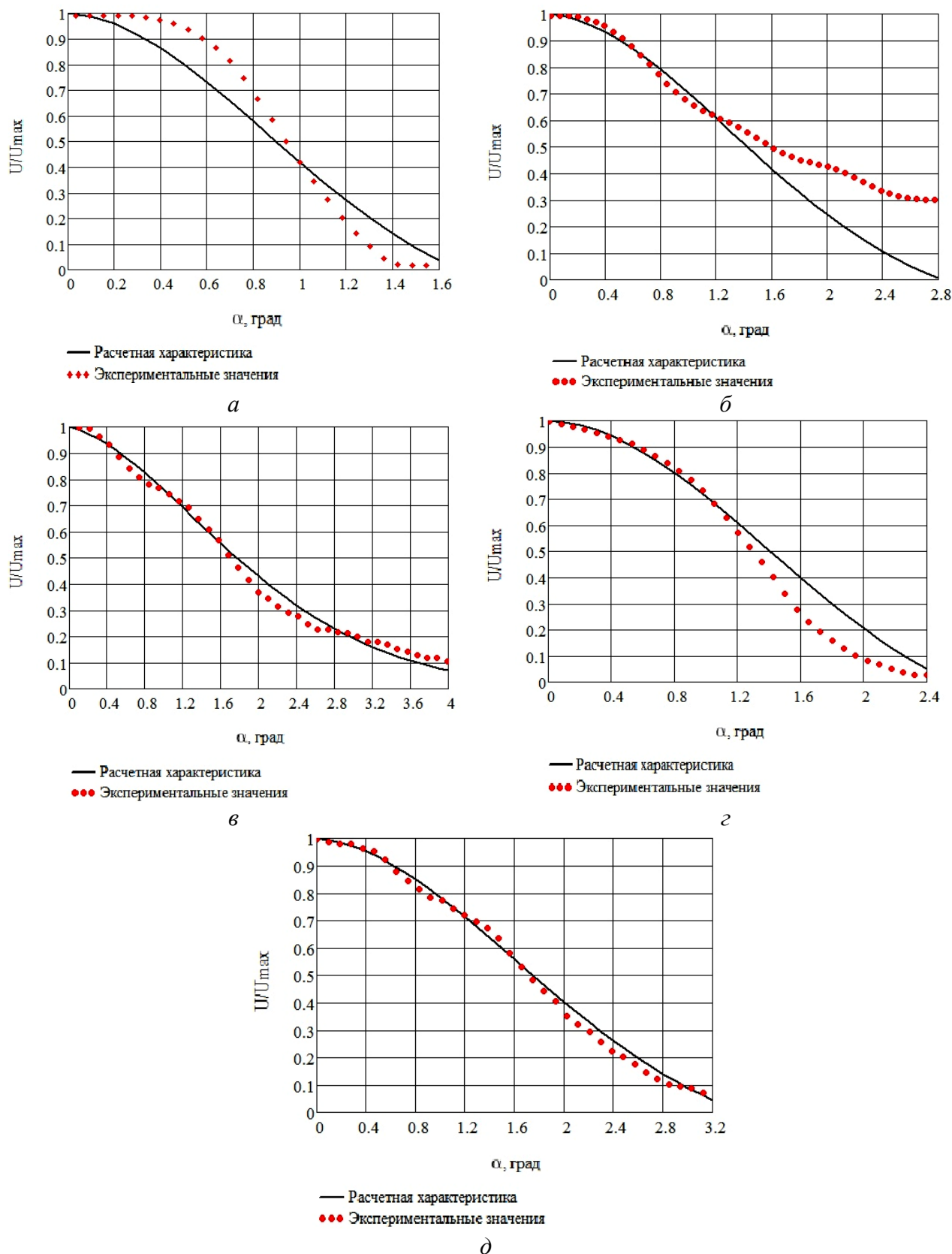


Рисунок 6 – Статические характеристики датчиков с размером камеры и пьезоэлементов соответственно
 а – 60 мм, $18 \times 1,4$; б – 60 мм, 10×1 ; в – 60 мм, $6 \times 0,74$; г – 28 мм, 10×1 ; д – 28 мм, $6 \times 0,74$

Теоретические и экспериментальные характеристики приведены на рисунке 6. Анализируя представленные расчетные и экспериментальные данные, можно сделать выводы о том, что математическая модель по выражению (5) позволяет более адекватно, чем по выражению (1), оценить реальный диапазон измерений датчика. При этом наибольшее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 7 % для пьезоэлемента $6 \times 0,74$, 15 % для пьезоэлемента 10×1 и 15 % для пьезоэлемента $18 \times 1,4$ для практически требуемого диапазона измерения угла $\pm 1^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есипов, В.Н. Гидроакустические средства измерения негоризонтальности железнодорожного пути / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов, А.А. Рыбин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6-2. – С. 60-66.
2. Есипов, В.Н. Гидроакустические датчики негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов // Сб. материалов 10-й Всероссийской научн.-техн. Конференции «Состояния и проблемы измерений». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – С. 54-55.

Незнанов Александр Иванович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», Орел

Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

E-mail: orelkir18@gmail.com

Есипов Виталий Николаевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», Орел

К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. 8(4862)41-98-76

A.I. NEZNANOV, V.N. ESIPOV

THE STATIC RESPONSE OF PENDULAR HYDROACOUSTIC SENSOR WITH AMPLITUDE METHOD OF RECEIVING INFORMATION FOR THE DISPARITY IN LEVELS OF RAILS MEASUREMENT

The mathematical expression for the static response of pendular hydroacoustic sensor is given and results of experiments are described.

Keywords: sensor, mathematical model, experimental data.

BIBLIOGRAPHY

1. Esipov, V.N. Gidroakusticheskie sredstva izmerenija negorizonta'lnosti zheleznodorozhnogo puti / V.N. Esipov, A.I. Neznanov, A.A. Rybin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – №6-2. – S. 60-66.
2. Esipov, V.N. Gidroakusticheskie datchiki negorizonta'lnosti s mehanicheskim majatnikovym chuvstvitel'nym jelementom / V.N. Esipov, A.I. Neznanov // Sb. materialov 10-j Vserossijskoj nauchn.-tehn. Kon-ferencii «Sostojanija i problemy izmerenij». – M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2008. – S. 54-55.

Neznanov Alexandr Ivanovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Assistant of department “Instrument engineering, metrology and certification”

E-mail: orelkir18@gmail.com

Esipov Vitaliy Nikolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Ph.: 8(4862)41-98-76

А.В. НИКИТИН

АЛГОРИТМЫ И ПОГРЕШНОСТИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА И ВЕКТОРА ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ ВЕРТОЛЕТА НА СТАРТОВЫХ И ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ РЕЖИМАХ

Рассматриваются особенности построения, алгоритмы обработки информации, статические и динамические погрешности бортовой системы измерения параметров ветра и истинной воздушной скорости вертолета на стоянке, при рулении и маневрировании по земной поверхности, на режимах взлета и посадки.

Ключевые слова: вертолет, стартовые и взлетно-посадочные режимы, вектор ветра, вектор воздушной скорости, измерение, система, построение, алгоритмы обработки информации, погрешности каналов, модели, анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть авиационных происшествий одновинтовых вертолетов связана с опрокидыванием вертолета набок, соударением лопастей рулевого винта с земной поверхностью ввиду отсутствия информации о фактических значениях скорости и направления вектора ветра относительно продольной оси вертолета на стоянке и на этапе запуска силовой установки, при рулении и маневрировании по земной поверхности (стартовые режимы), а также на режимах взлета, висения, снижения и посадки (взлетно-посадочные режимы).

Измерение параметров вектора скорости ветра на стоянке при запуске силовой установки, а также параметров вектора истинной воздушной скорости и других воздушных сигналов вертолета на стартовых и взлетно-посадочных режимах бортовыми средствами затрудняется значительными аэродинамическими возмущениями, вносимыми индуктивным потоком несущего винта. При этом способность вертолета совершать движения вперед-назад, вправо-влево и связанный с этим пространственный характер воздушных потоков, воспринимаемых приемниками первичной аэрометрической информации, ограничивает использование на вертолетах традиционных для самолетов систем измерения воздушных сигналов [1].

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Учитывая специфику работы бортовой системы измерения параметров ветра и вектора истинной воздушной скорости на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета, предложено построить ее на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, конструктивная схема которого приведена на рисунке 1 [2, 3].

Комбинированный аэрометрический приемник содержит неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник 1 [4], выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3, между внутренними профилированными поверхностями которых в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений P_i , определяющих величину W и горизонтальный угол направления ψ вектора ветра W на стоянке до запуска силовой установки несущего винта. На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления $P_{ст.д}$ при наличии составляющих вектора ветра в азимутальной плоскости. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия 5 для забора давлений $P_{\alpha i}$ и $P_{\alpha i-1}$, определяющих угол ветра в вертикальной плоскости.

Воспринимаемые неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником первичные информативные сигналы в виде давлений $P_i, P_{ст.д}, P_{\alpha i}, P_{\alpha i-1}$ позволяют определить величину W и положение ψ вектора скорости ветра W относительно продольной оси вертолета или продольную W_x и боковую W_z составляющие вектора ветра на стоянке до запуска силовой установки и раскрутки трансмиссии, используя приведенные ниже алгоритмы обработки информации [4].

На первом этапе обработки информативных сигналов по номеру i -й трубки полного давления, в которой давление P_i наибольшее, определяется первое приближение ψ_{mi} угловой координаты направления вектора скорости ветра W в соответствии с соотношением

$$\psi_{mi} = \frac{360}{n} i, \quad (1)$$

где n – количество расположенных под одинаковым углом трубок полного давления (как правило $n = 6$ или $n = 8$).

На втором этапе обработки массива давлений P_i проводится предварительная оценка азимутального угла направления ψ вектора скорости ветра W . С этой целью сравниваются между собой давления P_{i-1} и P_{i+1} и проверяется какое из неравенств выполняется

$$P_{i-1} > P_{i+1} \text{ или } P_{i-1} < P_{i+1},$$

где P_{i-1} и P_{i+1} – давления, измеренные в трубках полного давления, смежных с i -ой трубкой.

В случае выполнения первого неравенства вектор скорости ветра W находится слева от i -й трубки полного давления, при выполнении второго условия – справа от i -ой трубки. Указанным положениям соответствуют знаки «плюс» или «минус» отклонения $\Delta\psi$ действительного положения ψ вектора скорости ветра от его первого приближения ψ_{mi} .

Для определения точного значения угловой координаты ψ вектора скорости ветра осуществляется преобразование реальной угловой характеристики трубок полного давления в другую систему координат путем введения безразмерной угловой координаты θ , начало которой совпадает с точкой пересечения смежных ветвей угловых характеристик $i-1$ и $i+1$ трубок полного давления.

Сущность такого преобразования координат сводится к замене углового отклонения $\Delta\psi$ угловой характеристики i -ой трубки полного давления от реального направления ψ вектора скорости ветра W на безразмерную координату θ , изменение которой определяется выбором шага t_0 введенной координатной сетки. Угловое положение θ i -й трубки полного давления относительно направления ψ вектора скорости ветра W в новой системе координат определяется из решения одного из уравнений:

$$\bar{P}_i = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{f(\theta)}{f(-\theta)} \quad \text{или} \quad \bar{P}_i = \frac{P_{i-1}}{P_i} = \frac{f(-\theta)}{f(\theta)}, \quad (2)$$

где $f(\theta)$ и $f(-\theta)$ – аппроксимирующие полиномы степени k , вычисленные по результатам предварительной градуировки неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника и описывающие соответственно правую и левую части угловой характеристики

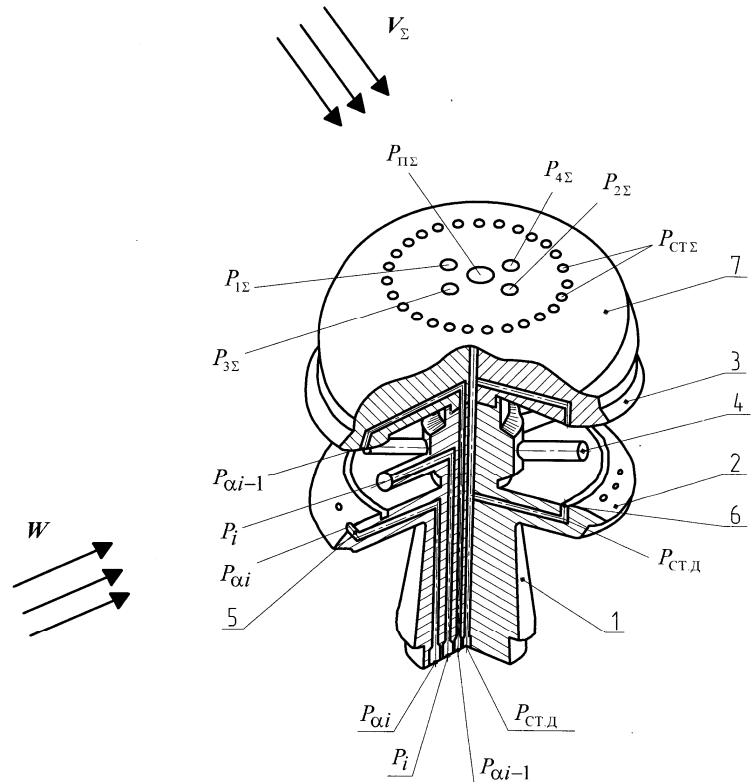


Рисунок 1 – Конструктивная схема неподвижного комбинированного аэрометрического приемника

смежных $i-1$ и $i+1$ трубок полного давления в введенной системе координат.

Тогда второе приближение угловой координаты ψ вектора скорости ветра W в исходной системе координат будет определяться выражением [4]

$$\psi = \psi_{mi} \pm (\theta_{\max} - \theta_x)t_0, \quad (3)$$

где t_0 – координатный шаг сплайн-функции, реализующей аппроксимирующий полином $P_i = f(\theta)$ в безразмерной системе координат, например при $n = 6$ $t_0 = 60^\circ$: $\theta_{\max}$ – максимальное значение безразмерной координаты θ на шаге t_0 , соответствующее $P_{i\max}$.

Для определения модуля (величины) W вектора скорости ветра по полученному значению θ_x безразмерного углового положения i -ой трубки полного давления вычисляется значение давления $P_{i\max}$, соответствующее совпадению направления вектора скорости ветра с осью i -ой трубки полного давления. Это вычисление проводится в соответствии со следующими зависимостями [4]:

$$P_{i\max} = \begin{cases} P_i \frac{f(\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} > P_{i+1}, \\ P_i \frac{f(-\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} < P_{i+1}. \end{cases} \quad (4)$$

По полученному значению $P_{i\max}$ определяется численное значение величины W скорости ветра с использованием выражения

$$W = \sqrt{\frac{2}{\rho_{H_0}}(P_{i\max} - P_{H_0})} = \sqrt{\frac{2P_{H_0}T_0}{P_0T_{H_0}}(P_{i\max} - P_{H_0})}, \quad (5)$$

где $\rho_{H_0} = \rho_0 \frac{P_{H_0}T_0}{T_{H_0}P_0}$ – плотность воздуха на высоте стоянки H_0 ;

P_{H_0} и T_{H_0} – статическое давление и абсолютная температура на высоте стоянки H_0 ;

$P_0 = 760$ мм.рт.ст. = 101325 Па и $T_0 = 288,15$ К – статическое давление и абсолютная температура на нулевой высоте стандартной атмосферы.

Статическое давление P_{H_0} и абсолютная температура T_{H_0} на высоте стоянки H_0 вертолета определяются по статическому давлению $P_{\text{ст.д.}}$, воспринимаемому неподвижным точным аэрометрическим приемником 1 (рис. 1), и по показаниям штатного приемника температуры торможения.

При работе двигательной установки и раскрутки трансмиссии на стоянке, при рулении и маневрировании вертолета по земной поверхности, на взлетно-посадочных режимах, при снижении и на режиме висения для определения параметров вектора ветра W и вектора истинной воздушной скорости V_v вертолета предлагается [3] использовать информацию аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта. В качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта вертолета используется вектор скорости V_Σ в виде геометрической суммы стационарных составляющих вектора скорости V воздушного потока, формируемого движением вертолета относительно окружающей среды вектором скорости ветра W , и вектора скорости V_i индуктивного воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, т.е. $V_\Sigma = V + V_i$. За меру величин составляющих вектора истинной воздушной скорости V_v вертолета принимаются углы ϕ_1 и ϕ_2 , определяющие угловое положение вектора скорости V_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, относительно осей неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, которые регистрируются ортогонально расположенными отверстиями для забора давлений P_1 и P_2 , P_3 и P_4 на поверхности полусферического приемника [2, 3].

По давлениям P_1 , P_2 и P_3 , P_4 , воспринимаемым отверстиями, расположенными на верхней поверхности полусферического приемника (рис. 1), используя известные соотноше-

ния [5], вычисляются углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора скорости V_Σ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта вертолета относительно осей приемника, по соотношениям вида [2]:

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\text{п}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right); \quad \varphi_2 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\text{п}\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right). \quad (6)$$

где φ_{01} и φ_{02} – углы установки отверстий для забора давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 .

Величину V_Σ скорости результирующего набегающего воздушного потока можно определить по полному $P_{\text{п}\Sigma}$ и статическому $P_{\text{ст}\Sigma}$ давлениям и температуре $T_{\text{т}\Sigma}$ заторможенного результирующего воздушного потока, используя зависимость [2]:

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{\text{т}\Sigma} \left[\left(\frac{P_{\text{п}\Sigma}}{P_{\text{ст}\Sigma}} \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left(\frac{P_{\text{п}\Sigma}}{P_{\text{ст}\Sigma}} \right)^{0,2857143}}}, \quad (7)$$

где параметры, входящие в формулу (7) имеют размерности в единицах системы СИ.

Для конкретного места установки неподвижного комбинированного аэрометрического приемника на фюзеляже вертолета составляющие V_{ix}, V_{iy}, V_{iz} вектора индуктивного потока V_i в связанной системе координат можно описать уравнениями вида [6]:

$$V_{ix} = k_{ix}|V_{i0}|; \quad V_{iy} = k_{iy}|V_{i0}|; \quad V_{iz} = k_{iz}|V_{i0}|, \quad (8)$$

где k_{ix}, k_{iy}, k_{iz} – безразмерные коэффициенты, определяемые по результатам летных испытаний системы на вертолете; $|V_{i0}| = \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}$ – модуль вектора скорости V_i индуктивного потока на режиме висения ($V=0$); G – текущий вес вертолета; n_y – нормальная перегрузка;

$\rho_H = \frac{P_H T_0}{T_H P_0}$ – плотность воздуха на высоте полета H ; P_H и T_H – статическое давление и температура на высоте H ; F – площадь, ометаемая несущим винтом вертолета; χ – коэффициент заполнения несущего винта.

Поскольку неподвижный комбинированный аэрометрический приемник расположен на фюзеляже на определенном радиусе-векторе R от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости V невозмущенного воздушного потока, набегающего на вертолет, которое определяется уравнением [6]

$$V_k = V + \omega \times R(x, y, z),$$

где V_k – кинематически искаженный вектор скорости набегающего воздушного потока в месте установки комбинированного аэрометрического приемника; $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости вращения вертолета относительно центра масс; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат; x, y, z – координаты места установки комбинированного аэрометрического приемника в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Проекция вектора V_k на оси связанной системы координат определяются как

$$V_{kx} = V_x + (\omega_y z - \omega_z y); \quad V_{ky} = V_y + (\omega_z x - \omega_x z); \quad V_{kz} = V_z + (\omega_x y - \omega_y x). \quad (9)$$

Тогда составляющие V_x, V_y, V_z , величина V_b , угол атаки α и угол скольжения β вектора V_b истинной воздушной скорости вертолета при рулении и маневрировании по земной поверхности и на взлетно-посадочных режимах вычисляются в соответствии с уравнениями вида:

$$\begin{aligned}
 V_x &= V_\Sigma \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{CT}\Sigma}} \right) \right] \times \\
 &\times \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{CT}\Sigma}} \right) \right] - K_{ix} |V_{i0}| - (\omega_y z - \omega_x y); \\
 V_y &= V_\Sigma \sin \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{CT}\Sigma}} \right) \right] \times \\
 &\times \cos \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{CT}\Sigma}} \right) \right] - K_{iy} |V_{i0}| - (\omega_z x - \omega_x z); \\
 V_z &= V_\Sigma \sin \left[90^\circ - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{CT}\Sigma}} \right) \right] - K_{iz} |V_{i0}| - (\omega_x y - \omega_y x); \\
 V_B &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} = \arcsin \frac{V_z}{V_B}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

При наличии на вертолете приемника спутниковой навигационной системы можно определить скорость V_p движения вертолета по земной поверхности, в соответствии с которой вычисляется вектор скорости ветра $W = V_B \pm V_p$ и его составляющие при рулении и маневрировании вертолета по земле:

$$\Psi = \beta + \psi_c; \quad W_x = V_x - V_{\Pi} \cos \psi; \quad W_z = V_z - V_{\Pi} \sin \psi; \quad W = \sqrt{W_x^2 + W_z^2}. \tag{11}$$

Используя информацию о величине V_{Π} и углу сноса ψ_c вектора путевой скорости V_{Π} вертолета от доплеровского измерителя скорости и угла сноса и информацию о составляющих V_x , V_z вектора истинной воздушной скорости, можно определить величину W и направление ψ вектора скорости ветра W или продольную W_x и боковую W_z составляющие вектора ветра на взлетно-посадочных режимах.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ

Бортовой системе измерения параметров ветра и вектора воздушной скорости вертолета на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, как и другим авиационным приборам и системам, свойственны систематические и случайные погрешности, которые разделяют на методические и инструментальные, статические и динамические.

Методические погрешности измерения скорости и направления ветра и составляющих вектора истинной воздушной скорости вертолета связаны с неадекватностью используемых алгоритмов формирования и обработки первичной аэрометрической информации, воспринимаемой неподвижным комбинированным аэрометрическим приемником.

Причины возникновения методических погрешностей системы, построенной на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, связаны с использованием приближенной модели вектора V_i скорости индуктивного потока несущего винта вертолета, моделей коэффициентов, учитывающих аэродинамические искажения поля давлений в месте расположения неподвижного комбинированного аэрометрического приемника на фюзеляже вертолета.

Для уменьшения методических погрешностей системы на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника по результатам летных испытаний системы на конкретном типе вертолета проводится уточнение алгоритмов вычисления параметров ветра и вектора истинной воздушной скорости вертолета.

Инструментальные погрешности системы связаны в основном с качеством изготовления неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, а также с погрешностями каналов преобразования первичных информативных сигналов и неточностью реализации

алгоритмов обработки в вычислителе.

При нормируемых условиях эксплуатации системы можно выделить систематические составляющие инструментальных погрешностей, тогда как в условиях реальной эксплуатации они являются детерминированными функциями случайных аргументов, которыми являются внешние условия и параметры входного контролируемого процесса, например, скорости результирующего воздушного потока, воспринимаемого неподвижным комбинированным аэрометрическим приемником. Следовательно, если выделить и учесть систематические составляющие инструментальной погрешности системы, можно уменьшить и случайные составляющие погрешности системы на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника.

Как видно из уравнений (10), составляющие V_x , V_y , V_z и величина истинной воздушной скорости V_b , угол атаки α и угол скольжения β являются функциями многих переменных вида:

$$\begin{aligned} V_x &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_y, \omega_z); \\ V_y &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_x, \omega_z, n_y, G); \\ V_z &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_2, \omega_x, \omega_y); \\ V_{\text{ист}} = V_b &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y, G); \\ V_{\text{пр}} &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y, G); \\ \alpha &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y, G); \\ \beta &= f(P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma}, T_{\text{т}\Sigma}, \varphi_1, \varphi_2, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y, G), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\varphi_1 = f(P_1, P_2, P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma})$; $\varphi_2 = f(P_3, P_4, P_{\text{п}\Sigma}, P_{\text{ст}\Sigma})$ вида (6).

Используя методику, предложенную Д.А. Браславским [7], можно получить соотношения для погрешностей определения параметров вектора истинной воздушной скорости в каналах системы на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника на взлетно-посадочных режимах, например, по каналу составляющей V_x в виде:

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= \frac{\partial V_x}{\partial P_{\text{п}\Sigma}} \Delta P_{\text{п}\Sigma} + \frac{\partial V_x}{\partial P_{\text{ст}\Sigma}} \Delta P_{\text{ст}\Sigma} + \frac{\partial V_x}{\partial T_{\text{т}\Sigma}} \Delta T_{\text{т}\Sigma} + \frac{\partial V_x}{\partial \varphi_1} \Delta \varphi_1 + \\ &+ \frac{\partial V_x}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2 + \frac{\partial V_x}{\partial \omega_y} \Delta \omega_y + \frac{\partial V_x}{\partial \omega_z} \Delta \omega_z + \Delta_{\text{обр}}; \end{aligned} \quad (13)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – множитель, определяющий влияние погрешностей Δx_i измерения параметров $P_{\text{п}\Sigma}$,

$P_{\text{ст}\Sigma}$, P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , $T_{\text{т}\Sigma}$, φ_1 , φ_2 , ω_x , ω_z , n_y , G , входящих в функции вида (12); $\Delta_{\text{обр}}$ – погрешность канала вычисления.

Получены функции влияния $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ погрешностей $\Delta P_{\text{п}\Sigma}$, $\Delta P_{\text{ст}\Sigma}$, $\Delta T_{\text{т}\Sigma}$, $\Delta \varphi_1$, ΔP_1 , ΔP_2 , $\Delta \varphi_2$,

ΔP_3 , ΔP_4 , $\Delta \omega_x$, $\Delta \omega_y$, $\Delta \omega_z$, Δn_y , ΔG измерения информативных параметров на погрешности ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z , ΔV_b , $\Delta \beta$ каналов системы на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника, вид которых для составляющей ΔV_x приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Функции влияния погрешностей

$\frac{\partial V_x}{\partial P_{\text{п}\Sigma}}$	$\frac{\partial V_x}{\partial P_{\text{ст}\Sigma}}$	$\frac{\partial V_x}{\partial T_{\text{т}\Sigma}}$	$\frac{\partial V_x}{\partial \varphi_1}$	$\frac{\partial V_x}{\partial \varphi_2}$	$\frac{\partial V_x}{\partial \omega_y}$	$\frac{\partial V_x}{\partial \omega_z}$
$\frac{P_{\text{ст}\Sigma} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\rho_{\Sigma} V_{\Sigma} P_{\text{п}\Sigma}}$	$-\frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\rho_{\Sigma} V_{\Sigma}}$	$\frac{V_{\Sigma} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{2 T_{\text{т}\Sigma}}$	$-V_{\Sigma} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2$	$-V_{\Sigma} \cos \varphi_1 \sin$	$-z$	y

Так как вероятность одновременного появления составляющих, входящих в соотношения (13), весьма мала, то при допущении об их некоррелированности суммарные погрешности каналов рассматриваемой системы можно оценивать их среднеквадратическими значениями, например вида:

$$\sigma_{\Delta V_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_x}{\partial P_{\Sigma}}\right)^2 \sigma_{\Delta P_{\Sigma}}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial P_{\Sigma\Sigma}}\right)^2 \sigma_{\Delta P_{\Sigma\Sigma}}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial T_{\Sigma}}\right)^2 \sigma_{\Delta T_{\Sigma}}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial \varphi_1}\right)^2 \sigma_{\Delta \varphi_1}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial \varphi_2}\right)^2 \sigma_{\Delta \varphi_2}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial \omega_y}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_y}^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial \omega_z}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_z}^2 + \sigma_{\text{обр}}^2}, \quad (14)$$

и далее аналогично для $\sigma_{\Delta V_y}, \sigma_{\Delta V_z}, \sigma_{\Delta V_{\text{ист}}}, \sigma_{\Delta V_B}, \sigma_{\Delta \beta}$.

Как видно из соотношений (13), (14) и таблицы 1, среднеквадратические погрешности $\sigma_{\Delta V_y}, \sigma_{\Delta V_z}, \sigma_{\Delta V_{\text{ист}}}, \sigma_{\Delta V_B}, \sigma_{\Delta \beta}$ зависят от параметров движения вертолета и погрешностей формирования и преобразования параметров $P_{\Sigma}, P_{\Sigma\Sigma}, T_{\Sigma}, P_1, P_2, P_3, P_4$, воспринимаемых неподвижным комбинированным аэрометрическим приемником в аэродинамическом поле вихревой колонны несущего винта.

Проведенный метрологический анализ позволяет обосновать требования к точности измерения параметров, входящих в алгоритмы вычисления параметров вектора истинной воздушной скорости вертолета системы на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника на стартовых и взлетно-посадочных режимах, когда аэрометрический приемник находится в створе вихревой колонны несущего винта.

Аналогичный подход может быть использован при анализе погрешностей измерения параметров ветра по аэрометрической информации $P_i, P_{ai}, P_{ai-1}, P_{\Sigma}$, воспринимаемой неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником на стоянке до запуска силовой установки.

Теоретический анализ методических погрешностей измерения параметров ветра по аэрометрической информации, воспринимаемой неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником, из-за отсутствия явных алгоритмов вычисления угла направления ψ и величины W скорости ветра представляет значительные трудности. На практике методические погрешности указанных каналов системы оцениваются по результатам летных испытаний на конкретном типе вертолета для конкретного места установки на нем неподвижного комбинированного аэрометрического приемника (АМП).

Инструментальные погрешности определения параметров ветра по аэрометрической информации неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника обусловлены неидентичностью повторяющихся в осевом направлении секций многоканального АМП, состоящих из проточных каналов, с расположенными в них трубками полного давления, погрешностями преобразования воспринимаемых давлений $P_i, P_{ai}, P_{ai-1}, P_{\Sigma}$ в электрические сигналы, погрешностями каналов их аналого-цифрового преобразования и обработки в вычислителе системы.

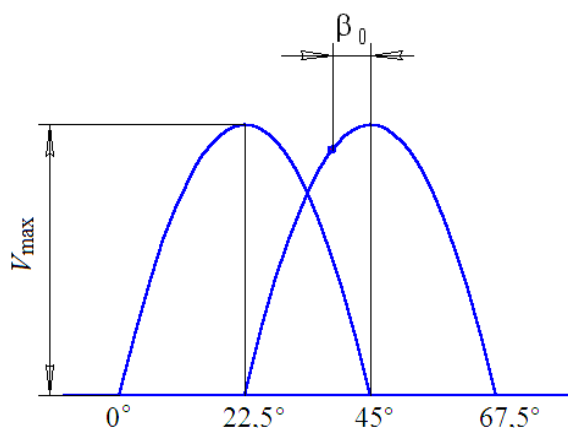


Рисунок 2 – Графическое представление угловых характеристик соседних приемных трубок многоканального проточного аэрометрического приемника

неподвижного многоканального проточного АМП.

Как показали исследования [8], абсолютная погрешность измерения угла направления ψ ветра из-за разброса углового положения приемных трубок АМП определяется по формуле:

словлены неидентичностью повторяющихся в осевом направлении секций многоканального АМП, состоящих из проточных каналов, с расположенными в них трубками полного давления, погрешностями преобразования воспринимаемых давлений $P_i, P_{ai}, P_{ai-1}, P_{\Sigma}$ в электрические сигналы, погрешностями каналов их аналого-цифрового преобразования и обработки в вычислителе системы.

Для оценки влияния углового положения трубок полного давления на погрешность измерения величины и направления вектора скорости ветра рассмотрим аналитическую модель угловых характеристик двух соседних трубок (рис. 2), в виде семейства функций $f(\cos(\beta_0, d, \Delta\beta))$, зависящих от параметров установки трубок полного давления неподвижного многоканального проточного АМП.

$$\Delta\psi = \frac{y_{i-1}(d, \beta_0)}{y_i(\beta_0)} - \frac{y_{i-1}(\beta_0)}{y_i(\beta_0)}, \quad (15)$$

где $y_{i-1} = \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{180}d - \frac{\pi}{180}\beta_0\right)$ – угловая характеристика $i-1$ трубки;

$y_i = \cos\left(\frac{\pi}{180}\beta_0\right)$ – угловая характеристика i трубки;

β_0 – угол отклонения трубки от положения, соответствующего точке максимума ее угловой характеристики, изменяющийся в пределах $\beta_0 = \psi_0/2$, где $\psi_0 = 360^\circ/2n$; n – число трубок полного давления; d – угловая погрешность установки трубки; $\Delta\psi$ – абсолютная погрешность измерения углового положения вектора скорости ветра из-за неточности задания углового положения осей приемных трубок многоканального проточного АМП.

Относительная погрешность измерения скорости ветра W от неточности задания углового положения осей приемных трубок АМП определяется следующей зависимостью из работы [8]:

$$\delta W = \frac{y(d, \beta_0) - y(\beta_0)}{y(\beta_0)}, \quad (16)$$

где $y(\beta_0) = \frac{1}{\cos \beta_0}$ – номинальная угловая характеристика трубки полного давления;

$y(d, \beta_0) = \frac{1}{\cos(\beta_0 - d)}$ – реальная угловая характеристика трубки полного давления;

δW – относительная погрешность измерения величины скорости ветра в зависимости от неточности задания углового положения осей трубок полного давления.

Погрешности измерения параметров ветра на стоянке, обусловленные разбросом и нестабильностью характеристик пневмоэлектрических преобразователей давлений и перепадов давлений, воспринимаемых неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником. Рассмотрим следующие характерные варианты влияния разброса и нестабильности параметров пневмоэлектрических преобразователей на характеристики выходных информативных сигналов измерительных каналов:

1. Предположим, что приращения информативных сигналов U_i по всем каналам измерения имеют величину ε_j , одинаковую для всех каналов. При этом вычислитель формирует некоторый эквивалент сигналов U_i и $U_{i\max}$, которые используются для определения углового положения канала относительно вектора воздушной скорости:

$$\begin{aligned} U_i &= f[k_i(\varepsilon_i + \Delta\varepsilon_i)]; \\ U_{i\max} &= f[k_i(\varepsilon_i + \Delta\varepsilon_{i\max})]. \end{aligned} \quad (17)$$

С точки зрения нормированной угловой характеристики (диаграммы направленности) секций неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника такое приращение информативных сигналов эквивалентно подъему (или опусканию) соответствующих участков угловой характеристики $f(\psi_X)$ на некоторую относительную величину δf . При этом относительная аддитивная погрешность вычисления углового положения ψ вектора ветра может быть определена по выражению [8]:

$$\delta\beta_a = f(\bar{\theta}) - f_n(\bar{\theta}) = \frac{f(\psi_0 - \psi_X) \pm \delta f}{f(\psi_X) \pm \delta f}. \quad (18)$$

2. Более общим случаем влияния разброса и нестабильности параметров пневмоэлектрических преобразователей на точностные характеристики канала угла направления ветра является неравенство приращений информативных сигналов ε_i пневмоэлектрических преобразователей, т.е.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{10} + \Delta\varepsilon_1; \quad \dots, \quad \varepsilon_m = \varepsilon_{m0} + \Delta\varepsilon_m.$$

Для упрощения анализа такого варианта зафиксируем одно из приращений, например $\Delta \varepsilon_1 = 0$, и проведем исследование только путем варьирования приращения $\Delta \varepsilon_m$.

В этом случае относительная аддитивная погрешность определения углового положения вектора ветра будет определяться соотношением из работы [8]:

$$\delta \beta_a = \frac{f(\psi_0 - \psi_X) - f(\psi_0 - \psi_X) \pm \delta f}{f(\psi_X)} \approx \frac{\pm \delta f}{f(\psi_X)}. \quad (19)$$

Динамические погрешности системы измерения параметров ветра и вектора воздушной скорости вертолета имеют место при неустановившихся режимах измерения. Причинами собственных динамических погрешностей каналов системы являются инерционность каналов передачи давлений от неподвижного комбинированного АМП к входам пневмоэлектрических преобразователей, а также динамические свойства последних.

Вынужденные динамические погрешности каналов системы обуславливаются внутренними шумами и внешними воздействиями (возмущениями набегающего воздушного потока). В отличие от собственной динамической погрешности, которая появляется только при изменении входного сигнала, вынужденная погрешность имеет место и при неизменном значении измеряемой величины.

Динамические свойства линейных измерительных каналов системы характеризуются передаточными функциями последовательно соединенных неподвижного комбинированного АМП и пневмоэлектрических измерительных каналов, так как инерционными свойствами каналов аналого-цифрового преобразования и микропроцессорной обработки электрических сигналов можно пренебречь.

С учетом конструктивных особенностей неподвижного комбинированного аэрометрического приемника (рис. 1) учитывают два основных инерционных элемента его пневматического тракта. При передаче воспринимаемых давлений АМП с помощью пневмопроводов их динамика учитывается звеном чистого запаздывания с постоянной времени τ_3 , зависящей от длины и диаметра пневмопроводов. Инерционные свойства пневмотрактов определяются участком с максимальными значениями τ_{1i} и τ_{2i} . В этом случае передаточная функция $W(p)$ измерительных каналов принимает вид [4]:

$$W(p) = \frac{Q e^{-\tau_3 p}}{\tau_1 \tau_2 \tau_T p^3 + \tau_T (\tau_1 + \tau_2) p^2 + \tau_T p + 1}, \quad (20)$$

где Q – чувствительность (коэффициент передачи) измерительного канала.

На практике для оценки динамической точности бортовых устройств часто используют сигналы, которые характеризуют типовые или наиболее неблагоприятные условия его работы и достаточно точно описываются некоторыми детерминированными функциями времени. Среди них следует выделить скачкообразные в виде «единичных» скачков, а также сигналы, соответствующие изменению контролируемого параметра с постоянной скоростью. При детерминированном входном сигнале, в соответствии с выражениями (20), собственная динамическая погрешность каналов, например, канала воздушной скорости и угла скольжения, определяется через обратное преобразование Лапласа [7]:

$$\Delta V_B(t) = L^{-1}\{[W(p) - Q_V]V(p)\}; \quad \Delta \beta(t) = L^{-1}\{[W(p) - Q_\beta]\beta(p)\}, \quad (21)$$

где Q_V и Q_β – коэффициенты передачи по каналам скорости и угла скольжения.

Изменение собственной динамической погрешности каналов истинной воздушной скорости и угла скольжения определяется видом корней характеристического уравнения передаточной функции $W(p)$. Если известны корни характеристического уравнения, например один действительный отрицательный $p_1 = \xi_1$ и два комплексно-сопряженных $p_{2,3} = \xi_2 \pm j\omega_0$, то при скачкообразном изменении скорости $V(t) = V_0 \cdot 1[t]$ или угла скольжения $\beta(t) = \beta_0 \cdot 1[t]$ выражения для собственной динамической погрешности исследуемых каналов будут иметь вид:

$$\Delta V_B(t) = -V_0 \left\{ \frac{\xi_2^2 + \omega_0^2}{(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2} e^{\xi_1 t} + \left[\frac{\xi_1(\xi_1 - 2\xi_2)}{(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{\xi_1(\omega_0^2 - \xi_2^2 - \xi_1 \xi_2)}{\omega_0[(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2]} \sin \omega_0 t \right] e^{\xi_1 t} \right\};$$

$$\Delta \beta(t) = -\beta_0 \left\{ \frac{\xi_2^2 + \omega_0^2}{(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2} e^{\xi_1 t} + \left[\frac{\xi_1(\xi_1 - 2\xi_2)}{(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{\xi_1(\omega_0^2 - \xi_2^2 - \xi_1 \xi_2)}{\omega_0[(\xi_1 - \xi_2)^2 + \omega_0^2]} \sin \omega_0 t \right] e^{\xi_1 t} \right\}. \quad (22)$$

Естественно, что при скачкообразном входном сигнале $\beta(t) = \beta_0 \cdot I[t]$ установившаяся собственная динамическая погрешность отсутствует, при изменении аэродинамического угла с постоянной скоростью $\dot{\beta}(t) = \omega_Z$ погрешность равна $\Delta \beta(t) = \tau_c \omega_Z$.

В общем случае входной сигнал $\beta(t)$ или $V(t)$ является случайной функцией времени. В качестве показателя динамической точности при этом используют среднее значение функции потерь в виде среднеквадратической погрешности $\sigma_{\Delta \beta}$ или $\sigma_{\Delta V}$.

Внешние помехи $\xi_V(p)$ и $\xi_\beta(p)$ определяются в основном атмосферной турбулентностью и особенностями обтекания неподвижного комбинированного АМП. Они имеют широкий спектр частот, поэтому могут быть аппроксимированы «белыми шумами» со спектральными плотностями мощности $S_{\xi_V}(\omega) = S_{V_0}$; $S_{\xi_\beta}(\omega) = S_{\beta_0}$. Возмущения, вызывающие инструментальные составляющие динамической погрешности, связаны со случайным изменением во времени конструктивных параметров измерительной цепи, а также с собственными шумами ее элементов. Изменения конструктивных параметров являются инфранизкочастотными и их влияние на динамические погрешности каналов системы воздушных сигналов вертолета за время одного полета может не учитываться.

Так как внешние помехи $\xi_V(t)$, $\xi_\beta(t)$ и измеряемые сигналы $V(t)$ и $\beta(t)$ можно считать некоррелированными, то суммарные дисперсии динамических погрешностей исследуемых каналов системы определяются соотношениями:

$$\sigma_{\Delta V}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p) - Q_V|_{p=j\omega}^2 S_V(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi_V}(\omega) d\omega;$$

$$\sigma_{\Delta \beta}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p) - Q_\beta|_{p=j\omega}^2 S_\beta(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi_\beta}(\omega) d\omega. \quad (23)$$

где $S_V(\omega)$ и $S_\beta(\omega)$ – спектральные плотности мощности изменения измеряемых сигналов.

Из выражения (23) следует, что при известных спектральных плотностях мощности входного сигнала и помехи для снижения собственной динамической погрешности необходимо передаточную функцию $W(p)$ приближать к Q , а для уменьшения вынужденной составляющей в полосе частот, где действует помеха, приближать к нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные алгоритмы обработки первичных информативных сигналов, формируемых неподвижным комбинированным аэрометрическим приемником, и проведенный анализ статических и динамических погрешностей измерительных каналов при детерминированном и случайном характере изменения контролируемых параметров позволяют обоснованно решать задачи проектирования бортовой системы измерения параметров ветра и вектора воздушной скорости вертолета на стартовых и взлетно-посадочных режимах, использовать конструктивно-технологические, алгоритмические и структурные методы повышения точности измерительных каналов системы [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Н.В. Системы измерения воздушных сигналов нового поколения / Н.В. Алексеев, Е.С. Вожаев, В.Г. Кравцов и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – №8. – С. 31-36.
2. Никитин, А.В. Стартовая система измерения параметров ветра и составляющих вектора воздушной скорости одновинтового вертолета / А.В. Никитин, В.В. Солдаткин // Фундаментальные проблемы техники и

технологии. – 2012. – №3. – С. 113-121.

3. Патент РФ на изобретение № 2426995, МПК G 01 P 5/00. Система измерения малых воздушных скоростей вертолета / В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин, Н.А. Порунов, Н.Н. Макаров, В.П. Белов, Д.А. Истомин. Заявл. 23.11.2009. Опубл. 20.08.2011. Бюл. №23.

4. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.

5. Петунин, А.Н. Методы и техника измерения параметров газового потока / А.Н. Петунин. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.

6. Козицин, В.К. Алгоритмическое обеспечение системы воздушных сигналов вертолета / В.К. Козицин // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – №4. – С. 52-57.

7. Браславский, Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1972. – 312 с.

8. Солдаткин, В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта / В.В. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 284 с.

Никитин Александр Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Тел.: +7(843)236-51-21

e-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

A.V. NIKITIN

**ALGORITHMS AND ERRORS OF ONBOARD SYSTEM
OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE WIND AND THE
VECTOR OF AIR SPEED OF THE HELICOPTER ON STARTING
AND TAKEOFF AND LANDING MODES**

Features of construction, algorithms of information processing, static and dynamic errors of onboard system of measurement of parameters of a wind and true air speed of the helicopter on parking are considered, while driving and maneuvering on the earth's surface, on takeoff and landing modes.

Keywords: *helicopter, starting and takeoff and landing modes, wind vector, vector of air speed, measurement, system, construction, algorithms of information processing, errors of channels, models, analysis.*

BIBLIOGRAPHY

1. Alekseev, N.V. Sistemy izmerenija vozdušnyh signalov novogo pokolenija / N.V. Alekseev, E.S. Vozhdaev, V.G. Kravcov i dr. // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2003. – №8. – С. 31-36.

2. Nikitin, A.V. Startovaja sistema izmerenija parametrov vetra i sostavljajushhih vektora vozdušnoj skorosti odnovintovogo vertoletaja / A.V. Nikitin, V.V. Soldatkin // Fundamental'nye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – №3. – С. 113-121.

3. Patent RF na izobretenie № 2426995, MPK G 01 P 5/00. Sistema izmerenija malyh vozdušnyh skorostej vertoletaja / V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin, N.A. Porunov, N.N. Makarov, V.P. Belov, D.A. Istomin. Zajavl. 23.11.2009. Opubl. 20.08.2011. Bjul. №23.

4. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmerenija aerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kазan': Izd-vo Kазan. gos. tehn. un-ta, 2001. – 448 s.

5. Petunin, A.N. Metody i tehnika izmerenija parametrov gazovogo potoka / A.N. Petunin. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 332 s.

6. Kozicin, V.K. Algoritmicheskoe obespechenie sistemy vozdušnyh signalov vertoletaja / V.K. Kozicin // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2006. – №4. – С. 52-57.

7. Braslavskij, D.A. Tochnost' izmeritel'nyh ustrojstv / D.A. Braslavskij, V.V. Petrov. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 312 s.

8. Soldatkin, V.V. Sistema vozdušnyh signalov vertoletaja na osnove nepodvizhnogo aerometricheskogo priemnika i informacii aerodinamicheskogo polja vihrevoj kolonny nesushhego vinta / V.V. Soldatkin. – Kазan': Izd-vo Kазan. gos. tehn. un-ta, 2012. – 284 s.

Nikitin Alexander Vladimirovich

The Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Graduate student of «Devices and information and measuring systems»

Ph.: +7(843)236-51-21

e-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.112

Е.В. ПАХОЛКИН, И.О. КОБЗЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА ТРЕНИЯ

В статье приводится описание усовершенствованной математической модели температуры на фактических пятнах контакта, учитывающей цикличность контактирования микронеровностей. Показано, что переход к такой модели позволяет получить результаты по оценке температуры в зоне трения, значительно отличающиеся от полученных ранее. Модель адаптирована для применения в качестве диагностической при реализации электропараметрического метода контроля пар трения. В качестве объекта контроля рассматривается наиболее распространенный тип – опоры качения.

Ключевые слова: моделирование температуры при трении, контактирование микронеровностей, электропараметрический метод диагностирования.

ВВЕДЕНИЕ

В разработанной ранее модели использовались такие параметры, как приращение средней объемной температуры, приращение температуры на номинальной и фактической площадях контакта [1, 2]. Причем приращение средней объемной температуры было получено для квазистационарного режима трения, приращения же температуры на номинальной и фактической площадях контакта получены А.В. Чичинадзе решением общей задачи теплопроводности для нестационарного режима трения, то есть для режима, при котором происходит однократный цикл трения при изменяющихся параметрах трения. Ввиду сложности оценки изменения данных параметров в одном цикле трения, при расчете соответствующих приращений температур используются их средние значения.

В качестве объекта исследования принято наиболее распространенное трибосопряжение – подшипник качения. В этом плане важной особенностью фрикционного взаимодействия шероховатой поверхности неподвижного кольца подшипника и поверхности контактирующего с ним тела качения состоит в том, что каждая из микронеровностей поверхности неподвижного кольца, вступающая в контакт, испытывает циклическое воздействие со стороны микронеровностей поверхностей тел качения. Тела качения, поочередно проходя зону максимального нагружения в подшипнике, при качении с проскальзыванием контактируют с одними и теми же микронеровностями неподвижного кольца. Таким образом, микронеровности поверхности неподвижного кольца функционируют в условиях квазистационарного повторного-кратковременного режима трения. Температура на фактической площади контакта микронеровностей при таком режиме зависит не только от продолжительности одного цикла трения, но и от длительности между данными циклами.

Это определяет необходимость в изменении ранее предложенной модели приращения температуры на номинальной и фактической площадях контакта с целью возможности расчета температуры на данных площадях при повторно-кратковременном режиме трения микронеровностей.

Задача решена с получением зависимости расчетного значения максимальной температуры в зоне трения от параметров контакта, фрикционного взаимодействия, условий и режимов контактирования. Модель в полной мере адаптирована для применения в качестве диагностической при реализации электрорезистивного метода трибодиагностики. Результатом решения модели является оценка максимальной (расчетной) температуры в зоне трения при различных сочетаниях двух диагностических параметров: нормированного интегрального

времени микроконтактирования и средней частоты микроконтактирований. Данные параметры, с одной стороны, являются диагностическими параметрами предлагаемого метода и подлежат экспериментальной оценке, с другой стороны, они описывают важнейшие параметры фрикционного взаимодействия – времен трения и охлаждения.

Дополнительно проведен учет структуры поверхности трения.

Базовые принципы выделения информации электрорезистивными методами, сформулированы и обоснованы в работе [1]. Их сущность заключается в следующем:

- на значение диагностического параметра влияют, в основном, только те участки рабочих поверхностей деталей, которые за время его измерения попадают в зоны нагруженных тел качения с кольцами;
- с увеличением нагрузки в контакте возрастает вероятность микроконтактирования деталей и чувствительность электрорезистивных диагностических параметров к состоянию находящихся в контактной зоне участков рабочих поверхностей;
- неравномерность распределения нагрузки между телами качения создает возможность задания требуемой чувствительности электрорезистивных диагностических параметров к различным участкам поверхностей путем их соответствующего нагружения.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

При построении математической модели принимаются следующие допущения:

- в подшипнике реализуется смешанный (полужидкостный) режим трения;
- скорость относительного перемещения трущихся поверхностей значительна (число Пекле $Pe > 20$);
- упругие деформации тел и дорожек качения пренебрежимо малы;
- контакты микронеровностей происходят в основном между рабочими поверхностями колец и максимально нагруженным телом качения;
- максимальная температура реализуется на рабочей поверхности неподвижного кольца в зоне его контакта с максимально нагруженным телом качения;
- за неподвижное кольцо принимается наружное.

Предпоследнее допущение объясняется тем, что при работе подшипника тела качения поочередно проходят зону максимального нагружения, вступая в контакт с одним и тем же участком рабочей поверхности неподвижного (наружного) кольца. Соответственно, на данном участке реализуется повторно-кратковременный режим трения, причем число циклов трения стремится к бесконечности (квазистационарный режим).

Согласно данным работы [3] приращение средней объемной температуры к начальной температуре для квазистационарного режима трения определяется выражением:

$$\Delta\Theta_{об} = \frac{\alpha_{тп} \cdot W_{тп}}{\sigma \cdot A_{вен} \cdot t_{охл}} \cdot \left(\frac{K \cdot t_{охл}}{e^{K \cdot t_{охл}} - 1} \right), \quad (1)$$

где $\alpha_{тп}$ – коэффициент разделения тепловых потоков (во многих случаях допускается использовать его среднее эффективное значение); $W_{тп}$ – работа сил трения, совершаемая за один цикл; σ – коэффициент теплоотдачи; $A_{вен}$ – площадь открытой вентилируемой поверхности элемента пары трения; $t_{охл}$ – время охлаждения (интервал времени между циклами трения); K – коэффициент, характеризующий теплопоглощающую и теплоотдающую способность элемента трения.

При условии равенства номинальных площадей трения, относящихся к различным деталям подшипника (кратковременный однократный контакт тела качения с рабочей поверхностью неподвижного кольца), коэффициент разделения тепловых потоков для неподвижного (1-го) элемента пары трения, при контакте с подвижным (2-ым) элементом может быть определен по формуле Ф. Шаррона

$$\alpha_{тп1} = \frac{\sqrt{\rho_{эт1} \cdot c_{эт1} \cdot \lambda_{эт1}}}{\sqrt{\rho_{эт1} \cdot c_{эт1} \cdot \lambda_{эт1}} + \sqrt{\rho_{эт2} \cdot c_{эт2} \cdot \lambda_{эт2}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{эт}1,2}$ – удельные плотности материалов пары трения; $c_{\text{эт}1,2}$ – удельные теплоемкости материалов пары трения; $\lambda_{\text{эт}1,2}$ – коэффициенты теплопроводности материалов пары трения.

Если в контакт вступают два элемента из одного и того же материала то данный коэффициент будет иметь значение 0,5 для обоих тел, составляющих пару трения.

В выражении (1) $W_{\text{тп}}$ представляет собой работу сил трения, совершаемую за один цикл, где под циклом трения понимается длительность одновременного контакта тела качения с обоими кольцами подшипника по вершинам микронеровностей. Эта работа может быть оценена как произведение силы трения ($F_{\text{тр}}$), среднего диаметра пятна фактического контакта (d_r) и косинуса угла между направлением действия силы трения и перемещением (α). Поскольку механическая работа – есть скалярная величина, выражение для ее определения для случая контакта микронеровностей можно записать как:

$$W_{\text{тп}} = F_{\text{тр}} \cdot d_r. \quad (3)$$

Максимальное значение силы трения скольжения определяется произведением коэффициента трения-скольжения ($f_{\text{ск}}$) и силой реакции опоры (N):

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{ск}} \cdot N. \quad (4)$$

Коэффициент трения скольжения определяется по справочным данным для сухих и чистых поверхностей. Сила реакции опоры равна по величине силе прижатия шарика к дорожке качения. В шарикоподшипнике, нагруженном радиальной силой F эта сила может быть определена как сила, действующая на максимально нагруженное тело качения:

$$F_a = \frac{4,37 \cdot F}{Z}, \quad (5)$$

где Z – число тел качения в подшипнике.

Средний диаметр фактического пятна для упругопластического контакта может быть оценен теоретически. В инженерной практике для движущихся и вращающихся узлов трения для расчета коэффициента теплоотдачи σ часто используется формула Т.П. Ньюкомба

$$\sigma = (17,1 + 22,7 \cdot \sqrt{v_{\text{ср}}}), \quad (6)$$

где $v_{\text{ср}}$ – скорость воздушного потока, обдувающего узел трения (если $v_{\text{ср}} = 0$,

$$\sigma = 17,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}) [3].$$

В выражении (1) присутствует площадь открытой вентилируемой поверхности элемента пары трения $A_{\text{вен}}$ (неподвижного кольца подшипника). Эта площадь может быть оценена исходя из конструктивных параметров подшипника и способа его монтажа в изделие.

Коэффициент K определяется выражением

$$K = \frac{\sigma \cdot A_{\text{вен}}}{m_{\text{эт}} \cdot c_{\text{эт}}}, \quad (7)$$

где $m_{\text{эт}}$ – масса элемента трения (неподвижного кольца); $c_{\text{эт}}$ – удельная теплоемкость материала элемента пары трения.

Масса элемента трения может быть оценена исходя из конструктивных параметров подшипника и удельной плотности материала неподвижного кольца. Значение удельной теплоемкости материала элемента трения является справочной величиной. (Например для стали ШХ-15 при температуре 300 К $c_{\text{эт}} = 480 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$).

Приращение средней поверхностной температуры для нестационарного режима трения на номинальной площади контакта неподвижного кольца определяется как:

$$\Delta\Theta_{\text{пов}} = \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{ТП}} \cdot b_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{ЭТ}} \cdot A_a \cdot t_T} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \tau_N + 0,333 \cdot \tau_W - \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \cdot \Sigma^* \right), \quad (8)$$

где Ψ_V – коэффициент, учитывающий понижение температуры за счет ее передачи в дополнительный теплопоглощающий объем; $b_{\text{эф}}$ – эффективная глубина передачи теплоты элемента трения за время трения; A_a – номинальная площадь контакта элементов пары трения; t_T – продолжительность трения; τ_N – временной фактор мощности трения; τ_W – временной фактор работы трения; Σ^* – добавочный коэффициент.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры за счет ее передачи в дополнительный теплопоглощающий объем, определяется исходя из выражения:

$$\Psi_V = \frac{m_{\text{ЭТ}} \cdot c_{\text{ЭТ}}}{m_{\text{ЭТ}} \cdot c_{\text{ЭТ}} + 0,5 \cdot m_{\text{см}} \cdot c_{\text{ЭТ}}}, \quad (9)$$

где $m_{\text{см}}$ – масса смазочного материала, закладываемого в узел трения [3].

Параметр $b_{\text{эф}}$ определяется по формуле

$$b_{\text{эф}} = 1,73 \cdot \sqrt{a_{\text{ЭТ}} \cdot t_T}, \quad (10)$$

где $a_{\text{ЭТ}}$ – коэффициент температуропроводности материала элемента трения.

Коэффициент определяется отношением коэффициента теплопроводности к произведению удельной теплоемкости и удельной плотности элемента трения $\rho_{\text{ЭТ}}$:

$$a_{\text{ЭТ}} = \frac{\lambda_{\text{ЭТ}}}{c_{\text{ЭТ}} \cdot \rho_{\text{ЭТ}}}. \quad (11)$$

Номинальную площадь контакта элементов трения в выражении (8) можно оценить с помощью модели площади эллиптического пятна контакта (согласно теории Герца):

$$A_a = \pi \cdot \mu \cdot v^3 \sqrt[3]{\left[\frac{3 \cdot (1 - \varepsilon^2)}{E \cdot \Sigma \rho} \cdot F_a \right]^2}, \quad (12)$$

где μ , v – коэффициенты, зависящие от геометрии контактирующих элементов, и определяемые по таблицам, представленным в [4]; ε , E – приведенные коэффициент Пуассона и модуль упругости первого рода; $\Sigma \rho$ – приведенная кривизна контактирующих поверхностей.

Величина τ_N в выражении (8) представляет собой временной фактор мощности трения, и характеризует распределение мощности трения в нормированном временном интервале 0..1, определяющим начало и конец процесса трения. Для выбора различных законов изменения τ_N в зависимости от текущего значения нормированного времени трения (τ) в ряде работ рекомендуется использовать семейство функций Гинзбурга. Каждая функция в данном семействе определена фиксированным значением $n = 0; 0,05; 0,2..$ и т.д. Физически n характеризует момент времени, когда τ_N достигает максимального значения. Выражение, определяющие τ_N в зависимости от n и τ для неподвижной микронеровности, имеет вид

$$\tau_N = (n+1) \cdot (n+2) \cdot \tau^n \cdot (1-\tau). \quad (13)$$

Для выбора из данного семейства функции, наиболее удачно описывающей закон изменения мощности во времени, необходимо располагать рядом сведений о нагрузке, действующей в единичном микроконтакте, скорости трения, а также коэффициенте трения [3].

Применительно к подшипникам качения скорость скольжения может быть найдена из скорости относительного проскальзывания сепаратора, которая в свою очередь может быть определена выражением

$$v_{\text{ск}} = v_{\text{сеп(теор)}} - v_{\text{сеп(действ)}}, \quad (14)$$

где $v_{\text{сеп(теор)}}$ – теоретическая линейная скорость движения сепаратора (скорость движения центров тел качения при условии отсутствия проскальзывания); $v_{\text{сеп(действ)}}$ – действительная линейная скорость движения сепаратора, которая всегда меньше теоретической вследствие проскальзывания.

Теоретическая линейная скорость движения сепаратора может быть определена из выражения:

$$v_{\text{сеп(теор)}} = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n_{\text{сеп}}}{60}, \quad (15)$$

где D_0 – средний диаметр подшипника; $n_{\text{сеп}}$ – частота вращения сепаратора мин^{-1} .

Частота вращения сепаратора определяется как:

$$n_{\text{сеп}} = n_{\text{в}} \frac{D_0 - D_{\text{ш}} \cdot \cos(\beta)}{2 \cdot D_0} + n_{\text{н}} \frac{D_0 + D_{\text{ш}} \cdot \cos(\beta)}{2 \cdot D_0}, \quad (16)$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр шарика; β – угол контакта в подшипнике.

Действительная линейная скорость движения сепаратора может быть оценена также по формуле (15) при экспериментальном измерении частоты вращения сепаратора.

Ввиду сложности оценки данных параметров для каждого отдельного фактического пятна контакта допускается, что мощность трения распределена по поверхности трения по тому же закону что и температурное поле. Температурное поле движущейся и неподвижной поверхности трения микронеровности определяется согласно законам, предложенным Х. Блоком.

Для неподвижной микронеровности (микронеровности неподвижного кольца), имеющей симметричное распределение температурного поля максимум температуры, а, следовательно, и мощности будет наблюдаться в момент времени $\tau = 0,5$. Соответствующая функция Гинзбурга характеризуется значением $n = 1$. При подстановке этих значений в выражение (13) временной фактор мощности трения принимает значение $\tau_N = 1,5$.

Параметр τ_W в (8) выражает изменение работы трения за время одного цикла трения. Согласно [3] величина τ_W оценивается при помощи семейства функций Гинзбурга, определяемых выражениями

$$\tau_W = \tau^{n+1} \cdot [(n+1) \cdot (1-\tau) + 1]. \quad (17)$$

Все функции τ_W семейства имеют максимум при $\tau = 1$, но различную крутизну, причем большая крутизна соответствует большему значению работы, совершаемой силами трения. Ввиду того, что закон распределения работы для каждого микроконтакта уникален, при расчетах допускается выбор функции, имеющей среднюю кривизну из предложенных, соответствующую $n = 1$. Соответствующее значение временного фактора работы трения для неподвижной микронеровности $\tau_W = 1$.

Добавочный коэффициент Σ^* в выражении (8) определяется как

$$\Sigma^* = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \cdot \exp(-\pi^2 \cdot m^2 \cdot F_0 \cdot \tau), \quad (18)$$

где m – число членов ряда; F_0 – число Фурье [3].

Причем:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{m^2} \cdot \exp(-\pi^2 \cdot m^2 \cdot F_0 \cdot \tau) \right) \rightarrow 0. \quad (19)$$

Принимая во внимание выражение (19), с целью упрощения расчетов допускается ограничиться лишь небольшим количеством m членов ряда. Если это число принять равным

100, а значение нормированного текущего времени τ равным 0,5 (что соответствует моменту достижения максимальной температуры на неподвижном фактическом пятне контакта) добавочный коэффициент будет иметь значение равное $\Sigma^* = 0,037$. Учитывая значения временных факторов мощности и работы трения для неподвижной микронеровности выражение (8) можно переписать в виде:

$$\Delta\Theta_{\text{пов}} = \frac{0,774 \cdot \alpha_{\text{тп}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{тп}} \cdot b_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{эТ}} \cdot A_a \cdot t_{\text{Т}}} \quad (20)$$

Использованная ранее модель зависимости величины температурной вспышки при трении для нестационарного режима, предложенная А.В. Чичинадзе, выглядит следующим образом:

$$\Delta\Theta_{\text{всп}} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{тп}} \cdot d_r \cdot a_{\text{эТ}}^{0,5}}{A_r \cdot t_{\text{Т}} \cdot \left[4 \cdot \lambda_{\text{эТ}} \cdot a_{\text{эТ}}^{0,5} + \lambda_{\text{эТ}} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{ск}})^{0,5} \right]}, \quad (21)$$

где d_r – средний диаметр фактического пятна контакта; A_r – суммарная фактическая площадь контакта; $v_{\text{ск}}$ – скорость относительного перемещения поверхностей при трении (скорость скольжения при микропроскальзывании).

При этом следует отметить, что данное выражение справедливо для режимов трения, при которых скорость скольжения $v_{\text{ск}}$ достаточна, чтобы число Пекле (Pe), определяемое как

$$Pe = \frac{v_{\text{ск}} \cdot d_r}{a_{\text{эТ}}}, \quad (22)$$

удовлетворяло условию $Pe \geq 20$ [3]. Кроме того, для более точной оценки величины температурной вспышки при ее расчете согласно выражению (21) необходимо учитывать зависимость входящих в данное выражение коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, а также плотности материала элемента трения (неподвижного кольца подшипника) от средней поверхностной температуры ($\Theta_{\text{пов}}$), определяемой соответственно как:

$$\Theta_{\text{пов}} = \Delta\Theta_{\text{пов}} + \Delta\Theta_{\text{об}} + \Theta_{\text{нач}}, \quad (23)$$

так как она является начальной температурой для микронеровностей, вступающих в контакт. Для многих металлов и композиционных материалов на металлической основе при объемной температуре 300..400 °C изменения данных коэффициентов могут достигать 30..40 % по сравнению с их значениями при нормальной температуре (20 °C), а результаты расчета поля температур по точным и усредненным оценкам этих коэффициентов расходятся в пределах 15..30 % [3].

Модели приращения температуры (8) и (18) получены решением общей задачи теплопроводности для нестационарного режима трения, то есть для режима, при котором происходит однократный цикл трения при изменяющихся параметрах трения (работы, мощности и скорости трения). Ввиду сложности оценки изменения данных параметров в одном цикле трения допускается использовать их средние значения.

УЧЕТ ЦИКЛИЧНОСТИ КОНТАКТИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ

Учет протворно-кратковременного характера контактирования микронеровностей выполнен следующим образом.

Известно выражение, определяющее максимальное приращение температуры на микронеровности ($\Delta\Theta_{\text{max}(N)}$), после N циклов нагружения (циклов трения). Это выражение имеет вид:

$$\Delta\Theta_{\max(N)} = 2 \cdot \frac{q}{\lambda_{\text{ЭТ}}} \cdot \left(\frac{a_{\text{ЭТ}}}{\pi} \right)^{0,5} \cdot \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t} - \sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t - t_{\text{T}}} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_{\text{T}}} \right) \quad (24)$$

где q – интенсивность теплового источника; t – текущее время.

После 1-го цикла нагружения, то есть в случае когда ($t = t_{\text{T}}, t_{\text{ОХЛ}} = 0$) выражение (24) преобразуется в выражение

$$\Delta\Theta_{\max(1)} = 4 \cdot \frac{q}{\lambda_{\text{ЭТ}}} \cdot \left(\frac{a_{\text{ЭТ}}}{\pi} \right)^{0,5} \cdot \sqrt{t_{\text{T}}} \quad (25)$$

Преобразованием выражения (25) можно получить

$$4 \cdot \frac{q}{\lambda_{\text{ЭТ}}} \cdot \left(\frac{a_{\text{ЭТ}}}{\pi} \right)^{0,5} \cdot \sqrt{t_{\text{T}}} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{ТП}} \cdot d_r \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5}}{A_r \cdot t_{\text{T}} \cdot \left[4 \cdot \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5} + \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{СК}})^{0,5} \right]} + \frac{0,774 \cdot \alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{ТП}} \cdot b_{\text{ЭФ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}} \cdot A_a \cdot t_{\text{T}}} + \Delta\Theta_{\text{об}(1)}, \quad (26)$$

где $\Delta\Theta_{\text{об}(1)}$ – приращение объемной температуры за один цикл трения.

Согласно выражениям (24) и (25) отношение температур микронеровности при N количестве циклов трения и при одном цикле определяется как

$$\frac{\Delta\Theta_{\text{всп}(N)}}{\Delta\Theta_{\text{всп}(1)}} = \frac{\sum_{j=1}^N \left(\sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t} - \sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t - t_{\text{T}}} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_{\text{T}}} \right)}{2 \cdot \sqrt{t_{\text{T}}}}. \quad (27)$$

Соответственно максимальное приращение температуры на фактических пятнах контакта при N количестве циклов трения в некоторый момент времени t определяется выражением

$$\Delta\Theta_{\text{всп}(N)} = \left(\frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{ТП}} \cdot d_r \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5}}{A_r \cdot t_{\text{T}} \cdot \left[4 \cdot \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5} + \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{СК}})^{0,5} \right]} + \frac{0,774 \cdot \alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{ТП}} \cdot b_{\text{ЭФ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}} \cdot A_a \cdot t_{\text{T}}} + \Delta\Theta_{\text{об}(1)} \right) \times \frac{\sum_{j=1}^N \left(\sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t} - \sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t - t_{\text{T}}} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_{\text{T}}} \right)}{2 \cdot \sqrt{t_{\text{T}}}}, \quad (28)$$

причем:

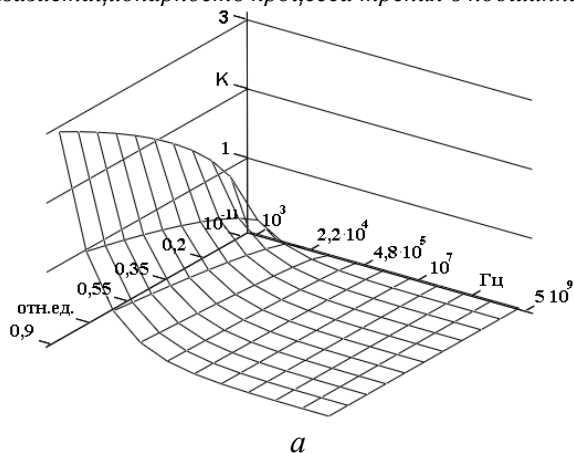
$$\Delta\Theta_{\text{об}(N)} = \Delta\Theta_{\text{об}(1)} \cdot \frac{\sum_{j=1}^N \left(\sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t} - \sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t - t_{\text{T}}} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_{\text{T}}} \right)}{2 \cdot \sqrt{t_{\text{T}}}} = \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot W_{\text{ТП}}}{\sigma \cdot A_{\text{всп}} \cdot t_{\text{ОХЛ}}} \cdot \left(\frac{K \cdot t_{\text{ОХЛ}}}{e^{K \cdot t_{\text{ОХЛ}}} - 1} \right). \quad (29)$$

Таким образом, максимальная температура на фактическом пятне контакта для квазистационарного режима трения может быть определена следующим образом

$$\Theta_{\max(N)} = \left(\frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{ТП}} \cdot d_r \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5}}{A_r \cdot t_{\text{T}} \cdot \left[4 \cdot \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot a_{\text{ЭТ}}^{0,5} + \lambda_{\text{ЭТ}} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{СК}})^{0,5} \right]} + \frac{0,774 \cdot \alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{ТП}} \cdot b_{\text{ЭФ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}} \cdot A_a \cdot t_{\text{T}}} \right) \times \frac{\sum_{j=1}^N \left(\sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t} - \sqrt{j \cdot t_{\text{ОХЛ}} + t - t_{\text{T}}} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_{\text{T}}} \right)}{2 \cdot \sqrt{t_{\text{T}}}} + \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot W_{\text{ТП}}}{\sigma \cdot A_{\text{всп}} \cdot t_{\text{ОХЛ}}} \cdot \left(\frac{K \cdot t_{\text{ОХЛ}}}{e^{K \cdot t_{\text{ОХЛ}}} - 1} \right) + \Theta_{\text{нач}}. \quad (30)$$

Для иллюстрации значимости введенных в математическую модель изменений можно привести результаты расчетов, показанные на рисунке 1 (приведены зависимости температуры от интегрального (относительного) времени и средней частоты микроконтактирований, являющихся диагностическими параметрами).

Модель приращения температуры, не учитывающая квазистационарность процесса трения в подшипнике



Модель приращения температуры, учитывающая квазистационарность процесса трения в подшипнике

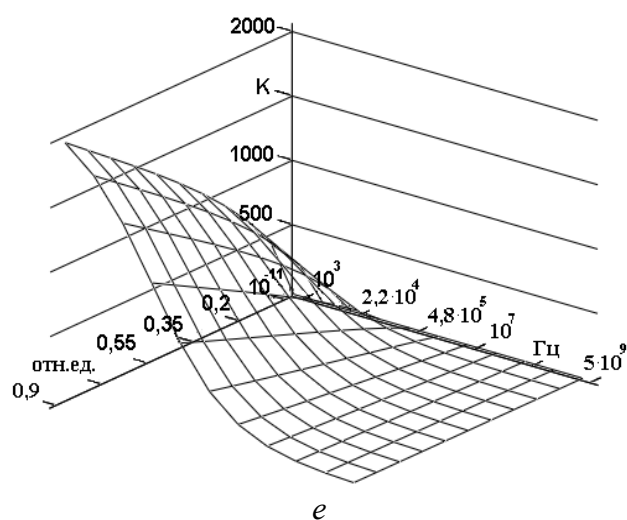
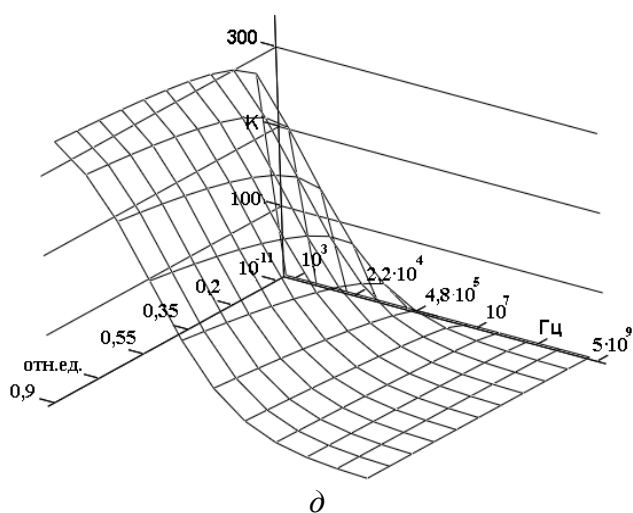
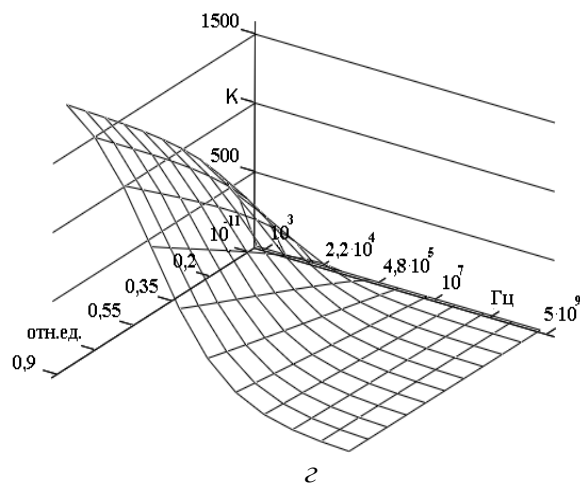
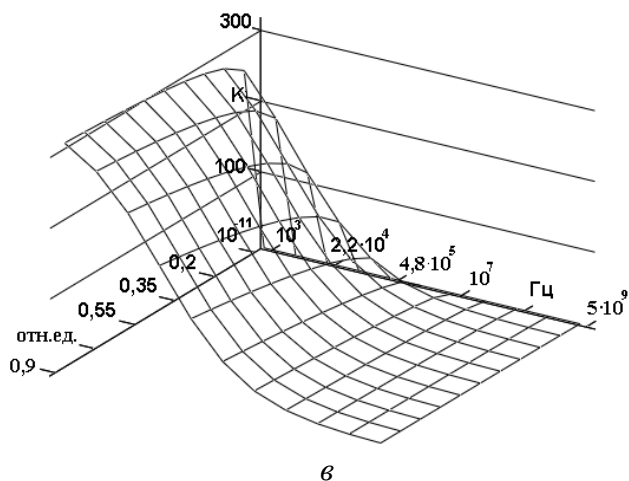
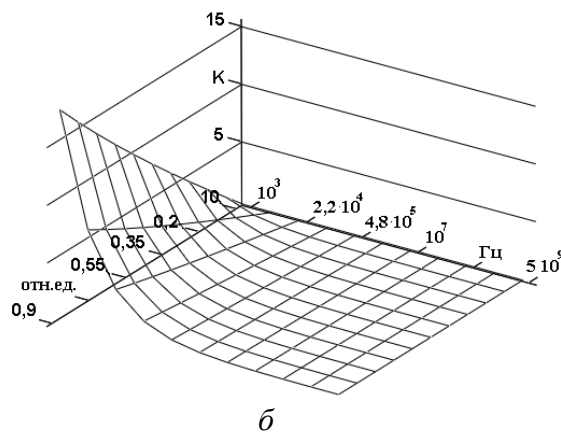


Рисунок 1 – Сравнение моделей оценки максимальной температуры в зоне трения

а, б – для приращения средней поверхностной температуры для номинальной площади контакта; в, г – для приращения на фактических пятнах контакта; д, е – для максимальной температуры

Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант 12-08-97579-р_центр_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6. – С. 143-150.
2. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6.2. – С. 34-40.
3. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с., ил.
4. Перель, Л.Я. Подшипники качения: справочник / Л.Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с., ил.

Пахолкин Евгений Васильевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл

Кандидат технических наук, профессор

Тел. 89208112686

E-mail: eugene_p@bk.ru

Кобзев Илья Олегович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл

Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. 89208085387

E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

E.V. PAKHOLKIN, I.O. KOBZEV

MATHEMATICAL MODEL OF THE MAXIMUM TEMPERATURE IN THE ROLLING BEARING FOR THE QUASISTATIONARY REPEATED AND SHORT-TERM MODE OF FRICTION

The description of advanced mathematical model of temperature is provided in article on the actual spots of the contact, considering recurrence of a contact of microroughnesses. It is shown that transition to such model allows to receive results on temperature assessment in a zone the friction which considerably are differing from received earlier. The model is adapted for application as diagnostic at realization of an electroparametrical control method of couples of friction. As object of control the most widespread type – rolling bearings is considered.

Keywords: temperature modeling at friction, contact of microroughnesses, electroparametrical method of diagnosing.

BIBLIOGRAPHY

1. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temeperatury v sharikopodshipnike. Chast' 1. Matematicheskaja model' maksimal'noj temperatury / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 6. – S. 143-150.
2. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temperatury v sharikopodshipnike. Chast' 2. Primenenie diagnosticheskikh parametrov jelektricheskoi gruppy / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 6.2. – S. 34-40.
3. Chichinadze, A.V. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka): uchebnyj dlja tehniceskikh vuzov. / A.V. Chichinadze, Je.D. Braun, N.A. Bushe. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 664 s., il.
4. Perel', L.Ja. Podshipniki kachenija: spravocnik / L.Ja. Perel'. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 543 s., il.

Pakholkina Evgeniy Vasilyevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor, professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. (4862) 41-98-76

E-mail: Eugene_P@bk.ru

Kobzev Iliya Olegovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Assistant of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. 89208085387

E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

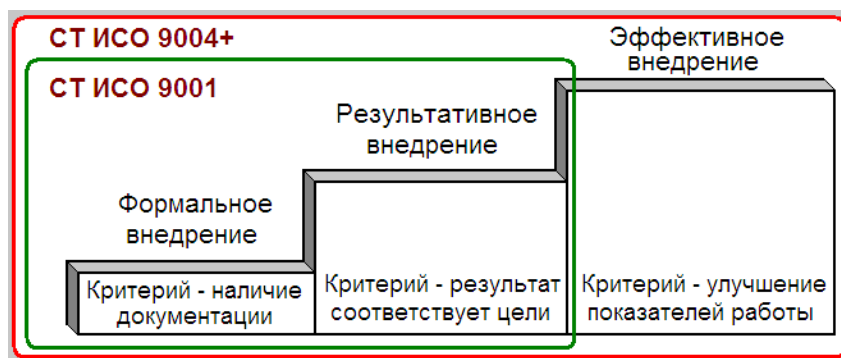
ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Выполнен анализ понятия «эффективность», как высшего уровня совершенства системы менеджмента качества. Проведён обзор методов количественной оценки эффективности процессов жизненного цикла продукции. Сформулирована основная проблема оценки эффективности процессов жизненного цикла продукции.

Ключевые слова: качество; система менеджмента качества; эффективность процесса; показатель качества; жизненный цикл продукции; методика оценки эффективности; методы менеджмента качества

ЭФФЕКТИВНОСТЬ – ВЫСШИЙ УРОВЕНЬ СОВЕРШЕНСТВА СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА

Система менеджмента качества разрабатывается в организациях с целью создания системного подхода к управлению хозяйственной деятельностью и повышения их способности удовлетворять выявленные и предполагаемые потребности потребителей. Как любой элемент хозяйственной деятельности, система менеджмента качества нуждается в постоянной оценке уровня её совершенства. Анализируя подходы к оцениванию системы менеджмента качества, сформулированные в международных стандартах ИСО серии 9000, можно выделить три уровня совершенства данной системы (рис. 1):



1) *формальное внедрение* – система менеджмента качества внедрена на уровне разработки всех документов, создание и поддержание которых в рабочем состоянии является одним из требований международного стандарта ИСО 9001:2008 (ГОСТ ISO 9001-2011);

2) *результативное внедрение* – система ме-

Рисунок 1 – Уровни совершенства системы менеджмента качества

неджмента результативна, то есть, все запланированные виды деятельности в системе осуществляются, а их предполагаемые результаты достигаются с постоянным повышением их количественных характеристик;

3) *эффективное внедрение* – система менеджмента качества приносит организации эффект, который может быть охарактеризован в виде соотношения между результатом приращения системы и ресурсами, затраченными на её разработку и внедрение.

Если можно признать, что получение прибыли, повышение технико-экономических показателей и развитие общественного признания деятельности организации является основной целью её существования, то эффективность становится высшим уровнем совершенства системы менеджмента качества. Кроме того, для достижения эффективности система менеджмента качества, как правило, должна пройти два начальных уровня своего развития – формальное внедрение и достижение результативности (по сути – управляемости).

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Эффективность не является обязательным сертификационным требованием к системе менеджмента качества, предъявляемым международным стандартом ИСО 9001. Данный стандарт требует, чтобы в организации были разработаны все документы, которые в нём указаны, а руководство могло продемонстрировать результативность системы и её постоянное

повышение [1]. Смысл этих минимальных требований очевиден – выдавая организации сертификат соответствия системы менеджмента качества стандарту ИСО 9001, орган по сертификации подтверждает, что в организации созданы *необходимые минимальные условия* для выпуска продукции, удовлетворяющей потребности потребителей, и что административная система организации управляема и пригодна для анализа её работоспособности. Таким образом, выполнение сертификационных требований стандарта ИСО 9001 и получение сертификата соответствия системы менеджмента качества не гарантирует организации эффективной работы – не гарантирует, что затраты на разработку и внедрение системы будут возмещены.

Для обеспечения эффективности системы менеджмента качества необходимо учитывать рекомендации международного стандарта ИСО 9004:2009 (ГОСТ Р ИСО 9004-2010). Однако данный стандарт является добровольным для применения, а его объём значительно превосходит объём «обязательного» (при сертификации) стандарта ИСО 9001. Кроме того, оценить эффективность системы менеджмента качества и её отдельных процессов достаточно сложно – даже если после внедрения системы технико-экономические показатели организации улучшились, а прибыль увеличилась, это не значит, что эффективность принесла именно система качества. При внедрении системы менеджмента качества происходит глубокая структурная перестройка системы управления организации, следовательно, повышается внимание к работе, улучшается производственная дисциплина, уделяется большее внимание поставщикам и потребителям, и, как следствие, повышается качество продукции, объём её производства и реализации. Но этот эффект принесла не система менеджмента качества – он вызван только переменами; пройдёт время – и всё вернётся к прежнему состоянию.

Следовательно, оценка эффективности системы менеджмента качества и её отдельных процессов является актуальной задачей, решение которой необходимо при стремлении к достижению наивысшего уровня совершенства системы, внедрённой в организации.

Этапы жизненного цикла продукции – это процессы системы качества, следовательно, в организации должны быть разработаны методы оценки эффективности на каждом этапе жизненного цикла. Анализ источников информации [3-20] показал, что известные методы оценки эффективности существуют, но не на каждом этапе. Ниже приведена характеристика методов оценки эффективности отдельных этапов жизненного цикла продукции.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Методы оценки эффективности маркетинговой деятельности предложены в работах [3-8]. В работе [3, С. 33-34] авторы В.В. Живетин, В.Л. Самохвалов, считают, что эффективность маркетинговой политики по отношению к конкретному предприятию (отрасли, группе отраслей) складывается из результатов совершенствования производственно-сбытовой деятельности по следующим основным направлениям: оптимальное использование потенциала рынка, в том числе для нового продукта; повышение достоверности прогнозных оценок; нахождение сегмента рынка данного товара; повышение точности анализа сбалансированности рынка.

В работе [4, С. 27] авторы М.В. Туган-Барановский, Л.В. Балабанова предлагают оценивать эффективность маркетинга по следующим направлениям: покупатели, маркетинговые интеграции, адекватность информации, стратегическая ориентация, оперативная эффективность. При этом авторы работы не определяют систему показателей оценки этих направлений и алгоритм расчёта эффективности маркетинговой деятельности.

В работе [5, С. 193-194] авторы Н.К. Моисеева, М.В. Конышева приводят показатели маркетинговой активности по функциям (исследования рынка, ассортиментная политика, сбытовая деятельность, коммуникационная деятельность) и обобщающие показатели (прибыльности, активности стратегии). Эти учёные в значительно более близкой степени приблизились к разработке алгоритма расчёта оценочного показателя эффективности маркетинга, однако, их работа содержит недостаточно полную информацию о доведении теоретической работы до практического применения. Недостаточность информации проявляется в отсутствии модели расчёта сводного показателя эффективности процесса маркетинга, а также в отсутствии сведений о шкалах, по которым авторы производят количественную оценку предложенных ими показателей эффективности маркетинга.

В работе [6, С. 803] автор Г. Ассель предлагает оценивать эффективность маркетинговой деятельности, как эффективность затрат на маркетинг. При этом с помощью экономико-статистических методов исследуется зависимость между затратами на маркетинг и результатом – объёмом продаж или прибылью.

В работе [7, С. 15-33] автор М. Мак-Дональд утверждает, что эмпирический подход к оценке эффективности маркетинга предпочтительнее, чем количественный, основанный на статистической проверке узких дедуктивных гипотез. Он приводит результаты исследования начала 90-х годов XX века, проводившегося в Великобритании, некоторых других европейских странах и США. Анализ эффективности маркетинга проводился по следующим направлениям: внутреннее отношение менеджмента компаний к маркетингу (его определение, роль и функции); организация маркетинговой деятельности (вовлечение в процесс стратегического планирования, уровень координации и информационного обмена между функциями маркетинга); практическое исполнение функций маркетинга (использование маркетинговых исследований, планирование, участие в разработке новых товаров и т.д.). Мак-Дональд в упомянутом выше исследовании замечает, что для того, чтобы достичь безупречного маркетинга в Великобритании, требуются всего три организационно-технических мероприятия: совершенствование информационной системы; измерение и мониторинг эффективности маркетинговой деятельности; инвестиции в обучение и развитие персонала.

В работе [8] автор Г.А. Яшева предлагает разработанный вариант анкеты, состоящий из 15 вопросов, по которым оценивается выполнение функций маркетинга по следующим направлениям: маркетинговые исследования, сегментирование рынка и позиционирование товара, анализ организации маркетинга, планирование маркетинга, разработка комплекса маркетинга. Каждый вопрос имеет 3 варианта ответа, которые оцениваются от 0 до 2-х баллов. Максимальное количество баллов по каждому вопросу равно двум. Количество баллов по каждому вопросу анкеты определяется в соответствии с разработанной таблицей. Максимальная оценка эффективности маркетинга равна 30 баллам. Для оценки уровня эффективности была разработана шкала оценки по принципу прогрессивного шага. В качестве экспертов, работающих с анкетой, выступали работники служб маркетинга, отделов сбыта, коммерческих отделов, выполняющих функции маркетинга.

Подводя итоги анализа содержания известных работ в области оценки эффективности маркетинговой деятельности, следует отметить, что этот этап жизненного цикла продукции наиболее полно охвачен исследованиями на предмет оценки эффективности. Существует достаточно большое количество научных и методических работ по оценке эффективности маркетинга, однако, единого общепринятого подхода к решению этой проблемы, построенного на методах квалиметрии, в проанализированных работах не выявлено.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Методы количественной оценки эффективности этапа планирования и разработки производственных процессов обнаружены в работах [9,10]. В проанализированных работах авторы М.А. Колесник и Е.Г. Непомнящий предлагают судить об эффективности этапа подготовки и разработки производственных процессов по комплексному показателю «годовой экономический эффект», который рассчитывается, как разность между экономической прибылью от реализации новых изделий после выплаты налогов и процентов за кредиты и капитальными вложениями.

Не умаляя значительного вклада авторов работ [9, 10] в создание методов оценки эффективности процессов жизненного цикла продукции, отметим, что проанализированная методика позволяет только комплексно оценить эффективность производственного процесса, а выделить эффективность отдельного этапа «планирование и разработка производственного процесса» (то есть, организацию производства и разработку технологического процесса изготовления изделия) с её помощью не представляется возможным, так как прибыль от реализации новых изделий является интегральным показателем экономической целесообразности их производства, который не может быть разложен на составляющие по вкладу в него отдельных этапов жизненного цикла продукции.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СНАБЖЕНИЯ

Методы оценки эффективности процесса «материально-техническое снабжение» (закупки) предложены в работах [11,12]. В работе [11] автор И.В. Кушнир предлагает рассчитывать эффективность материально-технического снабжения с помощью методики, состоящей из комплекса показателей и расчётов: обеспеченность организации материальными ресурсами; средний дневной расход каждого вида материалов, необходимых для производства продукции; анализ оборачиваемости материальных ресурсов; материалоотдача; материалоёмкость; расчёт влияния изменения затрат на материальные ресурсы и материалоёмкости на объём производства товаров.

В работе [12] автор Н.В. Кириллова предлагает оценивать эффективность материально-технического снабжения по ключевым показателям эффективности (далее КПЭ). Приблизительный набор КПЭ составляет около 27 показателей. Показатели распределяются между сотрудниками в соответствии со штатным расписанием. По итогам периода работы для каждого сотрудника рассчитывается интегрированный показатель в зависимости от отклонений фактических значений от плановых, также учитывается весовой коэффициент показателя и выводится балльная оценка для каждого сотрудника.

Таким образом, методика Н.В. Кирилловой позволяет оценить эффективность процесса «материально-техническое снабжение» с точки зрения человеческого фактора – как эффективность работы отдельных сотрудников-снабженцев. Методика И.В. Кушнирова, напротив, предназначена для оценки эффективности процесса «материально-техническое снабжение» по техническим факторам – по полноте обеспечения организации материальными ресурсами. Выявить единую и общепризнанную методику оценки эффективности данного этапа жизненного цикла продукции не представилось возможным.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПА «ПРОИЗВОДСТВО»

Методы оценки эффективности производства продукции предложены в работах [13,14]. В данных работах авторы предлагают оценивать эффективность производства комплексной системой показателей, в которую входят: показатели эффективности использования отдельных видов ресурсов и затрат; показатели имущественного положения; показатели ликвидности; показатели финансовой устойчивости; показатели деловой активности; показатели рентабельности производства.

Обобщённого критерия оценки эффективности производства в ходе анализа источника информации [13] обнаружено не было. В работе [14] авторы приходят к выводу о необходимости введения общего интегрального показателя эффективности производства, который рассчитывается, как отношение стоимости чистого продукта, с учётом его состава и качества, к совокупным затратам и вложениям в производство данного продукта.

Отметим, что заявленная система показателей эффективности производства позволяет провести оценку исключительно по экономическим критериям, а такой подход не во всех случаях может оказаться достаточным.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ

Метод оценки эффективности подготовки и разработки производственных процессов предложен в работе [15]. В данной работе предполагается, что оценка эффективности этапа «контроль и проведение испытаний» может быть выполнена исключительно экспертным методом. То есть эксперт, исходя из принципов оценки эффективности, может анализировать этап контроля. К принципам оценки эффективности авторы относят: ориентацию на результаты; соответствие делу; своевременность контроля; гибкость контроля; простоту контроля; экономичность контроля. Данный метод, несомненно, не является сложным в реализации, однако, он не является объективным, так как оценка эффективности этапа «контроль и проведение испытаний» будет во многом зависеть от квалификации эксперта. Кроме того, оценка эффективности одного из этапов жизненного цикла продукции экспертным методом (в баллах), приводит к потере объективности оценки при комплексировании результатов.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПА «УПАКОВКА И ХРАНЕНИЕ»

Обзор научно-технической литературы показал, что существует ряд работ, посвящённых проблемам качества упаковки продукции [16,17], в которых для определения качества

упаковки предложена методика экспертной оценки с привлечением потенциальных потребителей. Однако данные работы посвящены оценке качества упаковки, как особого вида продукции, а не оценке эффективности процесса упаковки готовых изделий. Поэтому необходимо отметить, что в проанализированных работах не выявлено методов оценки эффективности этапа упаковки готовой продукции.

Методик оценки эффективности этапа хранения продукции в проанализированных работах выявить не удалось. Для отдельных видов продукции выявлены стандарты с методиками испытаний на сохраняемость, но данные стандарты содержат только описание правил хранения изделий и требования к их характеристикам после хранения, а требования к оценке эффективности процесса хранения в них отсутствуют.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПА «РЕАЛИЗАЦИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ»

Метод оценки эффективности этапа реализации и распределения готовой продукции предложен в работе [18]. В данной работе автор А.В. Попов предлагает оценивать эффективность реализации и распределения путём расчёта разности между среднегодовым оборотом продукции после проведения рекламной кампании и среднегодовым оборотом продукции до внедрения рекламной кампании. Также проводится расчёт экономической эффективности от рекламирования продукции, как разности между получением дополнительных финансовых средств после проведения рекламной кампании и затраченными средствами на рекламу.

Следует сделать вывод о том, что предложенные методы расчета эффективности реализации и распределения продукции имеют весьма условный характер. Предложенные методы расчета скорее можно отнести к этапу маркетинговых исследований, чем к этапу распределения продукции.

ВЫВОДЫ

Обзор научно-технической и учебной литературы по проблеме оценки эффективности этапов жизненного цикла промышленной продукции показал, что по данной проблеме известно достаточно большое количество работ [2 - 20], однако, методики оценки эффективности, предлагаемые авторами проанализированных работ, посвящены, как правило, только некоторым этапам жизненного цикла продукции, и не охватывают весь цикл осуществления проекта от выявления потребности и создания замысла нового изделия до утилизации продукции, выработавшей свой ресурс, и снятия устаревшего проекта с производства. В частности, не выявлены методики оценки эффективности таких этапов жизненного цикла продукции, как «Проектирование и разработка продукции», «Монтаж и подготовка к эксплуатации», «Техническая помощь и обслуживание», «Утилизация и переработка в конце срока службы».

Таким образом, существующие методики оценки эффективности этапов жизненного цикла продукции не соответствуют двум важнейшим принципам Всеобщего менеджмента качества – «Процессный подход» и «Системный подход к менеджменту», а единая и общепризнанная методика оценки эффективности жизненного цикла продукции, как единой системы взаимосвязанных видов деятельности, на сегодняшний день отсутствует.

В этой связи актуальной проблемой повышения эффективности системы менеджмента качества является разработка комплекса методов оценки эффективности процессов жизненного цикла продукции, объединённых в единую оценочную модель и адаптированную для конкретных категорий продукции и этапов её жизненного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2011. – 32 с.
2. Пономарев, С.В. История управления качеством: учеб. пособие. / С.В. Пономарев, Е.С. Мищенко. – Тамбов: Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2009. – 84 с.
3. Живетин, В.В. Маркетинг: теория и практика. / В.В. Живетин, В.Л. Самохвалов. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 286 с.
4. Туган-Барановский, М.В. Маркетинг, менеджмент: научное издание. / М.В. Туган-Барановский, Л.В. Балабанова. – Донецк: ДонГУЭТ, 2001. – 594 с.

5. Моисеева, Н.К. Управление маркетингом: теория, практика, информационные технологии: учеб. пособие. / Н.К. Моисеева, М.В. Конышева. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 304 с.
6. Ассэль, Г. Маркетинг: принципы и стратегия: учебник для вузов. / Г. Ассэль. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 804 с.
7. Мак-Дональд, М. Стратегическое планирование маркетинга / М. Мак-Дональд. – СПб.: Питер, 2000. – 320 с.
8. Яшева, Г.А. Эффективность маркетинга: методика, оценки и результаты / Г.А. Яшева. – Витебск: Изд-во Витебского государственного технологического университета, 2009. – 26 с.
9. Колесник, М.А. Расчёт экономической эффективности комплекса работ технологического профиля / М.А. Колесник. – СПб.: Питер, 2006. – 242 с.
10. Непомнящий, Е.Г. Экономика и управление предприятием / Е.Г. Непомнящий. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – 56 с.
11. Кушнир, И.В. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности / И.В. Кушнир. – М.: Инфра-М, 2007. – 215 с.
12. Кириллова, Н.В. Ключевые показатели эффективности для системы снабжения / Н.В. Кириллова. – М.: Инфра-М, 2006. – 204 с.
13. Ковалев, В.В. Финансовый анализ / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 314 с.
14. Савицкая, Г.В. Экономический анализ / Г.В. Савицкая. – М.: Новое знание, 2004. – 640 с.
15. Королев, А.А. Методы и средства повышения эффективности контроля качества / А.А. Королев. – М.: Инфра-М, 2006. – 224 с.
16. Подобед, Д.О. Оценка технической эффективности полиграфических комплексов для производства упаковки из картона / Д.О. Подобед. – СПб.: Питер, 2007. – 242 с.
17. Южалин, В.Е. Эффективность и перспективы развития упаковки в РФ / В.Е. Южалин. – М.: Инфра-М, 2007. – 236 с.
18. Попов, А.В. Теория организации управления / А.В. Попов. – М.: Бек, 2005. – 312 с.
19. Чайка, И.В. Стандарты ИСО серии 9000 версии 2000: как их осваивают в России / И.В. Чайка, В.Н. Галлеев // Стандарты и качество. – 2001. – № 5-6. – С. 62-64.
20. Кабаков, Ю.В. Построение системы менеджмента организации / Ю.В. Кабаков // Стандарты и качество. – 2006. – № 4. – С. 70-75.

Марков Владимир Владимирович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл

К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

Отрубянников Александр Николаевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-98-21

E-mail: pms35@ostu.ru

V.V. MARKOV, A.N. OTRUBYANNIKOV, K.V. PODMASTERYEV

PROBLEM OF APPRAISAL A EFFICIENCY THE PROCESSES OF LIVING CYCLE OF PRODUCTION IN THE SYSTEM OF QUALITY MANAGEMENT

A concept of «efficiency», which is appearing a high level of perfection a system of quality management, is executed. A survey of methods quantitative appraisal the efficiency of processes living cycle of production is conducted. Is formulated a basis problem of appraisal the efficiency of processes living cycle of production.

Keywords: quality; system quality management; effecting of process; index of quality; living cycle of production; methodic of appraisal the efficiency; methods of quality management.

BIBLIOGRAPHY

1. GOST ISO 9000-2011. Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'. – M.: Standartin-form, 2011. – 32 s.
2. Ponomarev, S.V. Istorija upravleniya kachestvom: ucheb. posobie. / S.V. Ponomarev, E.S. Mishhenko. – Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009. – 84 s.
3. Zhivetin, V.V. Marketing: teoriya i praktika. / V.V. Zhivetin, V.L. Samohvalov. – M.: INFRA-M, 2008. – 286 s.
4. Tugan-Baranovskij, M.V. Marketing, menedzhment: nauchnoe izdanie. / M.V. Tugan-Baranovskij, L.V. Balabanova. – Doneck: DonGUJeT, 2001. – 594 s.
5. Moiseeva, N.K. Upravlenie marketingom: teoriya, praktika, informacionnye tehnologii: ucheb. posobie. / N.K. Moiseeva, M.V. Konysheva. – M.: Finansy i statistika, 2002. – 304 s.
6. Assjel', G. Marketing: principy i strategiya: uchebnik dlja vuzov. / G. Assjel'. – M.: INFRA-M, 1999. – 804 s.
7. Mak-Donal'd, M. Strategicheskoe planirovanie marketinga / M. Mak-Donal'd. – SPb.: Piter, 2000. – 320 s.
8. Jasheva, G.A. Jefferktivnost' marketinga: metodika, ocenki i rezul'taty / G.A. Jasheva. – Vitebsk: Izd-vo Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2009. – 26 s.
9. Kolesnik, M.A. Raschjot jekonomicheskoy jefferktivnosti kompleksa rabot tekhnologicheskogo profilja / M.A. Kolesnik. – SPb.: Piter, 2006. – 242 s.
10. Nepomnjashhij, E.G. Jekonomika i upravlenie predpriyatiem / E.G. Nepomnjashhij. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 1997. – 56 s.
11. Kushnir, I.V. Analiz i diagnostika finansovo-hozjajstvennoj dejatel'nosti / I.V. Kushnir. – M.: Infra-M, 2007. – 215 s.
12. Kirillova, N.V. Kljuchevyje pokazateli jefferktivnosti dlja sistemy snabzheniya / N.V. Kirillova. – M.: Infra-M, 2006. – 204 s.
13. Kovalev, V.V. Finansovyj analiz / V.V. Kovalev. – M.: Finansy i statistika, 2005. – 314 s.
14. Savickaja, G.V. Jekonomicheskij analiz / G.V. Savickaja. – M.: Novoe znanie, 2004. – 640 s.
15. Korolev, A.A. Metody i sredstva povyshenija jefferktivnosti kontrolja kachestva / A.A. Korolev. – M.: Infra-M, 2006. – 224 s.
16. Podobed, D.O. Ocenka tekhnicheskoy jefferktivnosti poligraficheskikh kompleksov dlja proizvodstva upakovki iz kartona / D.O. Podobed. – SPb.: Piter, 2007. – 242 s.
17. Juzhalin, V.E. Jefferktivnost' i perspektivy razvitija upakovki v RF / V.E. Juzhalin. – M.: Infra-M, 2007. – 236 s.
18. Popov, A.V. Teoriya organizacii upravleniya / A.V. Popov. – M.: Bek, 2005. – 312 s.
19. Chajka, I.V. Standarty ISO serii 9000 versii 2000: kak ih osvaivajut v Rossii / I.V. Chajka, V.N. Galleev // Standarty i kachestvo. – 2001. – № 5-6. – S. 62-64.
20. Kabakov, Ju.V. Postroenie sistemy menedzhmenta organizacii / Ju.V. Kabakov // Standarty i kachestvo. – 2006. – № 4. – S. 70-75.

Markov Vladimir Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel, Russia

Associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”, candidate of technical science, associate professor

Phone: (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

Otrubyannikov Alexandr Nikolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Postgraduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

Podmasteryev Konstantin Valentinovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Sc.D in Technical Sciences, head of “Instrument engineering, metrology and certification” chair

Phone: (4862) 419802

E-mail: asms-orel@mail.ru

А.Ф. КУЛАКОВ, Т.С. ПОЛУХИН

ВИДЫ АУДИТА И СПОСОБЫ ЕГО ОРГАНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ГОСУНИВЕРСИТЕТА-УНПК

В статье описаны виды аудита системы менеджмента качества (СМК), рассмотрены способы проведения аудита. На примере одного из видов аудита определена полнота оценки процессов проектирования, разработки и реализации основных образовательных программ Госуниверситета-УНПК.

Ключевые слова: система менеджмента качества, аудит соответствия, аудит работоспособности, чек-лист, паспорт процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку основной целью СМК является обеспечение качества выходов процессов организации, важно, чтобы виды деятельности, используемые для достижения этой цели, были эффективными и обеспечивали максимальную ценность. В современных условиях возрастающей конкуренции организации не имеют времени, финансовых средств и других ресурсов для того, чтобы поддерживать неэффективные и не создающие добавочной ценности виды деятельности. Это означает, что внутренние процессы, образующие СМК, должны быть согласованы, взаимосвязаны и эффективны [1, 2]. Основным методом оценки качества реализации указанных процессов может быть аудит.

ВИДЫ АУДИТА И СПОСОБЫ ЕГО ОРГАНИЗАЦИИ В СМК

Основные положения, касающиеся организации проверок систем менеджмента, содержатся в стандарте ISO 19011:2011 (ГОСТ Р ИСО 19011:2012). Аудит позволяет оценивать процесс достижения результативности, а затем эффективности СМК во времени, определять темпы ее роста. Современные информационные технологии открывают широкие возможности для получения оперативных данных, их своевременной обработки и анализа, а также реагирования на данные мониторинга путем принятия решений на их основе [1, 4].

При проверке СМК, аудитор должен, главным образом, концентрироваться на верификации того обстоятельства, что принятые в соответствии с требованиями ИСО 9001 политика, процедуры и практические руководства действительно имеются и применяются внутри организации. Данный аспект аудита предполагает подтверждение соответствия и имеет два варианта окончания: "прошел" или "не прошел". Однако аудит *соответствия* не ставит своей целью проверки пригодности политик, процедур и практических руководств для достижения целей организации. Иными словами, аудит соответствия не добавляет ценности для организации [1, 5].

Сегодня организациям для укрепления своей конкурентоспособности нужно нечто большее, чем аудиты соответствия [1, 6]. Вследствие сложности большинства современных СМК, а также некорректного проектирования методов получения запланированных результатов и методов управления, важно, чтобы аудитор изучал фактические выходы процессов для подтверждения того, что желаемые выходы получены. Данный аспект аудита связан с подтверждением результативности СМК.

В настоящее время в организациях, стремящихся повысить свою конкурентоспособность, более востребован другой тип аудита, называемый "аудитом *работоспособности*". В процессе аудита работоспособности исследуются три аспекта: соответствие правилам и нормам; результативность применения данных правил и норм; пригодность правил для достижения целей организации [1, 7].

Важно понимать, что аудит работоспособности нуждается в данных, подтверждающих соответствие. Необходимо иметь факты, которые будут анализироваться. Для того чтобы работать на основе анализа отклонений, требуется мониторинг и измерения, которые вле-

кут за собой получение новой информации и совершенствование работы организации [1, 8, 9].

Аудиты работоспособности наиболее подходят для внутренних нужд: контролируется состояние организации и используемые ресурсы, принимаются маркетинговые решения. Внутренние аудиторы могут определить причины наблюдаемых несоответствий. Они являются членами команды и участниками решения проблем.

Современные аудиты качества должны представлять собой сочетание аудитов соответствия и работоспособности. К проведению аудита необходимо тщательно готовиться, выполнять оценку с высокой степенью профессионализма и представлять отчет, содержащий важные сведения для заинтересованных сторон [1].

При разработке плана аудита, уровень его детализации может различаться для внешнего и внутреннего аудитов, а также в зависимости от области аудита.

План аудита должен содержать следующее:

- цели аудита;
- критерии аудита и ссылочные документы;
- область аудита;
- дату и место проведения аудита;
- роль и ответственность членов группы по аудиту и сопровождающих лиц.

При проведении сертификационного аудита (аудита соответствия), план включает даты проведения вводного и заключительного совещаний, а также указание на рабочий язык аудита, в случае если есть различия между языком, на котором говорят аудиторы и персонал аудируемого предприятия.

План аудита может содержать указания, касающиеся содержания отчета по аудиту, методов классификации несоответствий, предполагаемой даты выпуска отчета, а также обеспечения конфиденциальности получаемой информации.

План аудита утверждается руководством органа по сертификации или руководством предприятия в случае внутреннего аудита (аудита работоспособности). В ходе аудита руководитель группы по аудиту вправе вносить изменения в план аудита [3].

В целях обеспечения наибольшей эффективности аудита качества стандартом ГОСТ Р ИСО 19011:2012 рекомендовано, чтобы руководитель группы по аудиту установил предварительный контакт с аудируемым предприятием. Цели предварительного контакта [3]:

- оформление договора о проведении аудита;
- определение каналов обмена информацией;
- обеспечение информацией относительно графика аудита и состава группы по аудиту;
- обеспечение доступа к соответствующим документам, включая записи, для последующей их оценки;
- определение правил безопасности "на месте";
- достижение совместного соглашения о необходимости обеспечения группы по аудиту сопровождающими лицами.

В целях получения полной информации о готовности организации к аудиту руководитель группы по аудиту предварительно анализирует документацию СМК и записи, включая отчеты по предыдущим аудитам.

Если в результате анализа выявлено, что документация не соответствует области аудита или установленным критериям, об этом следует проинформировать заказчика аудита, аудируемое предприятие и ответственного за управление программой аудита. В этом случае дальнейшее расходование ресурсов на аудит прекращается до тех пор, пока не будут удовлетворительно решены все возникшие вопросы.

Применительно к аудиту соответствия, по результатам анализа оформляется письменное заключение, в котором наряду с выявленными замечаниями формулируется вывод о возможности или невозможности проведения аудита СМК "на месте".

Что касается аудита работоспособности, предварительный анализ документации позволяет повысить эффективность аудиторской проверки и выявить дополнительные возможности улучшения системы качества.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОТЫ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ГОСУНИВЕРСИТЕТА-УНПК НА ОСНОВЕ ЧЕК-ЛИСТА

Одной из значимых составляющих эффективности функционирования организации является самооценка ее деятельности, бизнес-процессов, бизнес-плана, рабочего плана команды и каждого члена команды. Для проведения такой самооценки необходимы соответствующие инструкции, где все процессы прописаны и имеются шаблоны всех основных документов. Такие инструкции называются «чек-листами» организационного развития. Чек-лист является частью аудита работоспособности, так как, оценивая соответствие процесса требованиям норм, позволяет определить результативность применения требований к процессу. Ответы на вопросы чек-листа позволяют аудитору получить в ходе аудита необходимую информацию о степени соответствия состояния объекта проверки установленным требованиям стандарта ГОСТ ISO 9001:2011. Чек-лист не является обязательным с точки зрения стандартов на СМК, тем не менее, он является одним из полезных инструментов аудитора. Многие предприятия используют контрольные листы с тем, чтобы убедиться, что проверяемая деятельность и процессы, как минимум, соответствуют требованиям, указанным в области аудита [3].

Чек-листы не миновали и систему образования, где они охватывают как отдельные дисциплины, так и процесс формирования компетенции учащегося по избранной профессии. Предлагаются своеобразные процессы самоконтроля над образовательным процессом, в которых чек-листы являются фактором контроля качества полученных знаний.

В управлении качества Госуниверситет-УНПК чек-листы служат для проведения внутреннего аудита образовательных процессов. Они позволяют определить, насколько полно оценивается процесс, и как отражается его соответствие требованиям ГОСТ ISO 9001-2011. Для оценки образовательной деятельности университета одним из самых важных является процесс проектирования, разработки и реализации основных образовательных программ (ООП), который установлен в паспорте процесса (ПП) ОрелГТУ 72-04-01-2009 и ПП ОрелГТУ 72-05-01-2009.

Для определения полноты оценки процесса проектирования и разработки ООП в чек-листе содержится двадцать три пункта, в которых перечислены контролируемые параметры. На их основе составлена таблица 1. Столбец 2 содержит контролируемые параметры. В столбце 3 находятся пункты ГОСТ ISO 9001-2011, в которых содержатся требования к соответствующим контролируемым параметрам. В столбце 4 приведены пункты документированных процедур проверяемых процессов и ответы на вопросы чек-листа. Столбец 5 содержит отметки о том, в достаточной ли степени процесс удовлетворяет требованиям контролируемых параметров чек-листа.

Проведенный анализ процесса проектирования и разработки ООП показывает, что из двадцати трех пунктов контролируемых параметров чек-листа, двадцать один полностью отвечают требованиям проверки, один пункт описывается с недостаточной степенью полноты и в одном случае информации, отвечающей требованиям, в паспорте процесса нет совсем.

В пункте 10 таблицы 1 представлен контролируемый параметр «определение необходимой компетентности и поддержание в рабочем состоянии записей об образовании, подготовке, навыках и опыте сотрудников, непосредственно связанных с процессом проектирования и разработки ООП». В паспорте процесса в пункте 6.4 «входы процесса» отмечается, что входами являются «требования к кадровому обеспечению персонала», что недостаточно полно удовлетворяет требованиям пункта 6.2.2 ГОСТ ISO 9001-2011 и самому пункту 10 таблицы 1. Требования к кадровому обеспечению не включают в себя поддержание в рабочем состоянии записей об образовании, подготовке, навыках и опыте сотрудников, непосредственно связанных с процессом проектирования и разработки ООП, что соответствует пункту 6.2.2 (е) ГОСТ ISO 9001-2011. Более в паспорте процесса о компетентности персонала и соответствующих записях нигде не упоминается.

Таблица 1 – Контролируемые параметры оценки процесса проектирования и разработки ООП

№ п/п	Контролируемые параметры	Пункты ГОСТ ISO 9001-2011	Пункты документов и ответы на вопросы чек-листа	Достаточно ли описание процесса
1	2	3	4	5
1	Разработка целей ООП (цели должны быть измеримыми и согласуемыми с Политикой в области качества) и их выполнение.	5.4.1, 7.1(a)	п.7.1.1, п.7.1.2	да
2	Планирование процесса проектирования и разработки ООП.	7.1	п.9, таблица 1	да
3	Обеспечение необходимыми ресурсами для поддержания процесса.	4.1(d) 6.1(b)	п.6.10	да
4	Обеспечение информацией, необходимой для поддержания процесса.	4.1(d)	п.6.10	да
5	Определены ли входные данные для проектирования ООП?	7.3.2	да, п.6.4	да
6	Установлено ли соответствие входных данных проекта ООП входным требованиям?	7.3.4 7.4	да. п.6.4, п.6. 9	да
7	Осуществлена ли верификация ООП – удостоверение того, что выходные данные проектирования соответствуют входным данным?	7.3.5	да. п.6.4, п.6.6, п.9, таблица 1	да
8	Осуществлена ли валидация проекта ООП – удостоверение того, что полученная продукция соответствует требованиям потребителей?	7.3.6	да, п.6.9, п.9, таблица 1	да
9	Определение и доведение до сведения персонала, распределение ответственности и полномочий при выполнении работ и мероприятий по данному процессу.	5.5.1	п.5, приложение А	да
10	Определение необходимой компетентности и поддержание в рабочем состоянии записей об образовании, подготовке, навыках и опыте сотрудников, непосредственно связанных с процессом проектирования и разработки ООП.	6.2.2	п.6.4	нет
11	Как часто осуществляется мониторинг и анализ процесса?	4.1(e)	один раз в год. предисловие п.5	да
12	Принимаются ли меры, необходимые для достижения запланированных результатов?	4.1(f)	да. п.7, таблица 2	да
13	Обеспечивается ли наличие соответствующих версий (копий) документов в местах их применения?	4.2.3(d)	да. п 1.2	да
14	Предотвращение непреднамеренного использования устаревших документов и применение соответствующей идентификации таких документов, оставленных для каких-либо целей.	4.2.3(g)	—	нет
15	Прошел ли проект рабочего учебного плана процедуру рассмотрения и согласования на заседании УМС института (факультета)?	7.3.1	да. п.7.2.3	да

продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
16	Наличие утвержденных УП в институте (в деканате, на кафедре) с отметкой УУ.	7.3.1	п.7.2.6	да
17	Наличие семестровых графиков учебных занятий.	7.3.2	п.7.3.1	да
18	Установление соответствия графиков учебных занятий требованиям СТО ОрелГТУ 72-04-05.	7.3.2	п.7.3.2	да
19	Установление соответствия рабочей программы учебной дисциплины требованиям СТО ОрелГТУ 72-04-06.	7.3.2	п.7.4.2	да
20	Соответствие комплектности и состава УМК требованиям СТО ОрелГТУ 72-04-04.	7.3.3	п.7.5.2	да
21	Осуществляется ли директором института (деканом факультета, зав. кафедрой) контроль обновления УМК дисциплин?	7.3.4	да. п.7.5.3	да
22	Наличие положений и других регламентирующих документов для проведения текущего контроля, ежемесячной, промежуточной и итоговой государственной аттестации.	7.3	п.7.6	да
23	Наличие и осуществление проектирования и разработки программ и методического обеспечения для организации и проведения практик студентов.	7.3	п.7.7	да

Пункт 14 «предотвращение непреднамеренного использования устаревших документов и применение соответствующей идентификации таких документов, оставленных для каких-либо целей» таблицы 1 в соответствии с пунктом 4.2.3(г) ГОСТ ISO 9001-2011 в паспорте процесса нигде не освещается.

Можно сделать вывод, что в целом процесс проектирования и разработки ООП оценивается достаточно полно.

Для определения полноты оценки процесса реализации ООП чек-лист содержит двенадцать пунктов, в которых перечислены контролируемые параметры. На их основе также составлена подобная таблица 2.

Таблица 2 – Контролируемые параметры оценки процесса реализации ООП

№ п/п	Контролируемые параметры	Пункты ГОСТ ISO 9001-2011	Пункты документированных процедур и ответы на вопросы чек-листа	Достаточно ли описание процесса
1	2	3	4	5
1	Обеспечение ППС кафедры соответствия объемов, тематики и содержания проводимых занятий утвержденным рабочим программам учебных дисциплин и подтверждение факта выполнения этих требований личными записями в учебных журналах академических групп после проведения занятий.	7.5.1	п.7.3.2	да

продолжение таблицы 2				
1	2	3	4	5
2	Обеспечение наличия ресурсов и информации, необходимых для поддержания процесса.	4.1 (d)	п.6.10	да
3	Свидетельства достижения целей ООП.	5.4.1	п.6.6, таблица 1	да
4	Как часто осуществляется мониторинг и анализ процесса с целью повышения его результативности?	4.1(е), 8.4	один раз в год, предисловие п.5, п.10	да
5	Принимаются ли меры, необходимые для достижения запланированных результатов?	4.1(f)	да, п.11, таблица 2	да
6	Определение и доведение до сведения персонала, распределение ответственности и полномочий при выполнении работ и мероприятий по данному процессу.	5.5.1	п.5, приложение А	да
7	Проводится ли анализ функционирования процесса, потребностей в ресурсах, возможностей к повышению результативности процесса и СМК в целом?	5.6	да, п.11, таблица 2	да
8	Определение необходимой компетентности и поддержание в рабочем состоянии записей об образовании, подготовке, навыках и опыте сотрудников, непосредственно связанных с процессом реализации ООП.	6.2.2	–	нет
9	Подтверждение выполнения индивидуальных планов работы преподавателей.	7.5.1	п.7.2.4, п.7.2.5	да
10	Организация самостоятельной работы студентов. Свидетельства доведения его до студентов.	7.5.1	п.7.3.5	да
11	Контроль СРС.	7.5.2	п.7.3.8	да
12	Отражение в протоколах результатов рассмотрение процесса реализации УМК на заседаниях кафедры.	7.5.2	п.7.4.2	нет
13	Анализ качества проведения: - ежемесячной аттестации; - текущего контроля; - промежуточной аттестации; - итоговой государственной аттестации студентов.	7.5.2	п.7.5.1, п.7.5.2.	да
14	Анализ уровня усвоения студентами программного материала.	8.4	п.7.5, таблица 1	да
15	Анализ качества проведения практик студентов.	7.5.2	п.7.5.6	да
16	Анализ результативности методического обеспечения учебного процесса.	6.1	п.11, таблица 2	да
17	Анализ результативности материально-технического обеспечения УП.	6.1	п.11, таблица 2	да
18	Анализ результативности процесса повышения квалификации.	6.2.2	п.11, таблица 2	да
19	Планирование и использование современных методов и технологий при реализации процесса.	7.1	п.11, таблица 2	да

Проведенный анализ паспорта процесса реализации ООП показывает, что из девятнадцати пунктов контролируемых параметров чек-листа, семнадцать полностью отвечают требованиям проверки, один пункт описывается с недостаточной степенью полноты и в одном случае информация, отвечающая требованиям, в паспорте процесса отсутствует.

Пункт 8 таблицы 2 «определение необходимой компетентности и поддержание в рабочем состоянии записей об образовании, подготовке, навыках и опыте сотрудников, непосредственно связанных с процессом реализации ООП» в паспорте процесса в соответствии с пунктом 6.2.2 ГОСТ ISO 9001-2011 нигде не освещается.

В пункте 12 таблицы 2 представлен контролируемый параметр «отражение в протоколах результатов рассмотрения процесса реализации УМК на заседаниях кафедры». Согласно пункту 7.4.2 паспорта процесса, процесс реализации УМК рассматривается на заседаниях кафедр и УМС факультетов, институтов. Однако в паспорте процесса не упоминается об отражении результатов рассмотрения в протоколах.

Процесс реализации ООП также в целом оценивается достаточно полно.

ВЫВОДЫ

Требования международного стандарта, содержащего рекомендации по аудиту систем менеджмента, подчеркивает важную роль аудита в постоянном развитии и совершенствовании систем менеджмента качества. Возможность использования различных способов аудита показывает актуальность исследования способов и возможностей его применения в СМК. Внедрение и проведение мероприятий по аудиту повышает производительность и качество деятельности организаций. Необходимость применения аудита доказывается многочисленными исследованиями в этой области и положительными практическими результатами. Многоплановость возможности применения аудита систем качества открывает большие возможности для новых исследований в этой области, которые помогут в улучшении деятельности организаций самого различного рода.

Применение чек-листа для проведения внутреннего аудита СМК образовательных процессов Госуниверситет-УНПК позволило выявить некоторые неточности и недочеты в работе процессов, что поспособствует улучшению их функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажин, Ю.В. Аудит системы менеджмента качества как средство повышения результативности / Ю.В. Сажин, Н.П. Плетнева // «Машиностроение». «Справочник. Инженерный журнал». – 2008. – №12. – С. 41-47.
2. Гличев, А.В. Предел или плацдарм развития? Размышления о будущем систем качества / А.В. Гличев // Стандарты и качество. – 2007. – № 11. – С. 18-23.
3. Бурмистров, Н.В. Аудит системы менеджмента качества на машиностроительном предприятии / Н.В. Бурмистров, Ю.В. Сажин, Н.П. Плетнева // «Машиностроение». «Справочник. Инженерный журнал». Приложение № 5. – 2010. – С. 2-24.
4. Arter D.R., Cianfrani C.A. How to Audit the Process-Based QMS // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 201 p.
5. Russel J.P. The Internal Auditing Pocket Guide, Second Edition // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2007. – 218 p.
6. Haggart B. The Biomedical Quality Auditor Handbook // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 250 p.
7. Arter D.R. Quality Audits for Improved Performance, Third Edition // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 135 p.
8. Kausek J. The Management System Auditor's Handbook // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2006. – 413 p.
9. Pfannerstill R. The Progressive Audit: A Toolkit for Improving Your Organizational Quality Culture // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2005. – 292 p.

Кулаков Анатолий Федорович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, начальник управления качеством и инновационных технологий в образовании

Тел.: 8 (4862) 41-98-27

E-mail: kulakov@ostu.ru

Полухин Тимофей Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел.: 8 915 500 08 02

E-mail: forreal28@gmail.com

A.F. KULAKOV, T.S. POLUKHIN

OVERVIEW OF AUDITING AND WAYS OF ITS ORGANIZATION IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ON THE EXAMPLE OF THE STATE UNIVERSITY- ESPC

The paper describes kinds of quality management system (QMS) auditing, and reviews methods of audit. The paper also determine completeness evaluation of engineering, development and implementation processes of major educational programs of the State University-ESPC (SU- ESPC) on the example of one of the types of audit.

Keywords: *quality management system, compliance audit, performance audit, checklist, process certificate.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sazhin, Ju.V. Audit sistemy menedzhmenta kachestva kak sredstvo povysheniya rezul'tativnosti / Ju.V. Sazhin, N.P. Pletneva // «Mashinostroenie». «Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal». – 2008. – №12. – S. 41-47.
2. Glichev, A.V. Predel ili placdarm razvitija? Razmyshle-nija o budushhem sistem kachestva / A.V. Glichev // Standarty i kachestvo. – 2007. – № 11. – S. 18-23.
3. Burmistrov, N.V. Audit sistemy menedzhmenta kachestva na mashinostroitel'nom predpriyatii / N.V. Burmistrov, Ju.V. Sazhin, N.P. Pletneva // «Mashinostroenie». «Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal». Prilo-zhenie № 5. – 2010. – S. 2-24.
4. Arter D.R., Cianfrani C.A. How to Audit the Process-Based QMS // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 201 p.
5. Russel J.P. The Internal Auditing Pocket Guide, Second Edition // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2007. – 218 p.
6. Hagggar B. The Biomedical Quality Auditor Handbook // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 250 p.
7. Arter D.R. Quality Audits for Improved Performance, Third Edition // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2003. – 135 p.
8. Kausek J. The Management System Auditor's Handbook // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2006. – 413 p.
9. Pfannerstill R. The Progressive Audit: A Toolkit for Improving Your Organizational Quality Culture // ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin. – 2005. – 292 p.

Kulakov Anatoliy Fyodorovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of quality and innovation in education department

Ph.: 8 (4862) 41-98-27

E-mail: kulakov@ostu.ru

Polukhin Timofey Sergeevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department «instrument making, metrology and certification»

Ph.: 8 915 500 08 02

E-mail: forreal28@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе получена зависимость для расчета точности технологических систем. Предложена методика прогнозирования параметрической надежности технологических систем. С применением предложенной методики построены модели вероятности безотказной работы токарного станка при обработке на нем цилиндрических и торцовых поверхностей.

Ключевые слова: прогнозирование; параметрическая надежность; технологическое оборудование.

Постоянный рост требований к продукции машиностроения обуславливает повышение точности деталей современных машин, изготавливаемых на металлорежущих станках. Расширяется область применения прецизионного технологического оборудования – станков классов точности В и С. В связи с этим, актуальной проблемой является не только достижение высокой точности станков, но и сохранение ее во времени, т.е. обеспечение параметрической надежности технологического оборудования [1, 2]. Для оценки параметрической надежности прецизионных станков целесообразно использование методов индивидуального прогнозирования потери их точности.

Металлорежущие станки (МРС) являются частью технологических систем, в состав которых входят режущие и измерительные инструменты, приспособления, обрабатываемая заготовка и оператор. Точность обработки зависит от всех компонентов технологической системы, поэтому используются два различных, но взаимодополняющих друг друга подхода к оценке точности станков. Первый подход основан на рассмотрении геометрической точности только станка с использованием ГОСТ на нормы точности МРС и ГОСТ 22267 [3], либо с использованием вариационного метода расчета точности МРС [4, 5]. Второй подход основан на анализе показателей точности обработанных деталей – функциональной диагностике станков [3, 4].

Выполненный в работе [4] анализ действующих стандартов на нормы точности МРС показал, что в их номенклатуры включены не все показатели, оказывающие влияние на точность обработанных деталей. Поэтому, в данной работе при индивидуальном прогнозировании параметрической надежности технологического оборудования использован первый подход с использованием вариационного метода расчета точности МРС. В его основе лежит функция формообразования вида $r_0 = A_{\Sigma} e^4$, где r_0 – радиус-вектор обрабатываемой поверхности; A_{Σ} – матрица преобразований координат, состоящая из матриц обобщенных перемещений и поворотов; e^4 – радиус-вектор начала координат. В работе [6] структурный состав технологической системы определен как:

$$A_{\Sigma} = A_{\text{пр1}} A_{\text{ст}} A_{\text{пр2}} A_{\text{и}}, \quad (1)$$

где A_{Σ} – матрица преобразований координат технологической системы;

$A_{\text{пр1}}$ – матрица, моделирующая движения приспособления для заготовки;

$A_{\text{ст}}$ – матрица, моделирующая движения станка;

$A_{\text{пр2}}$ – матрица, моделирующая движения приспособления для инструмента;

$A_{\text{и}}$ – матрица, моделирующая режущие кромки (поверхности) инструмента.

Полная вариация функции формообразования технологической системы ΔA_{Σ} , без учета деформаций ее элементов, равна:

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_{\text{пр1}} A_{\text{ст}} A_{\text{пр2}} A_{\text{и}} + A_{\text{пр1}} \Delta A_{\text{ст}} A_{\text{пр2}} A_{\text{и}} + A_{\text{пр1}} A_{\text{ст}} \Delta A_{\text{пр2}} A_{\text{и}} + A_{\text{пр1}} A_{\text{ст}} A_{\text{пр2}} \Delta A_{\text{и}}, \quad (2)$$

и в нее входят матрицы малых поворотов и смещений по осям координат: $\Delta A_{\text{пр1}}$ – приспособления под заготовку; $\Delta A_{\text{ст}}$ – станка; $\Delta A_{\text{пр2}}$ – приспособления под инструмент; $\Delta A_{\text{и}}$ – инструмента.

Векторный Δr_0 и скалярный балансы технологической системы равны, соответственно:

$$\Delta r_0 = \Delta A_{\Sigma} e^4, \quad (3)$$

$$\Delta r n = \Delta r_0 n, \quad (4)$$

где n – вектор нормали к обрабатываемой поверхности.

На основе выражений (2) и (3) можно поставить различные задачи исследования и обеспечения точности и параметрической надежности технологических систем, при учете влияния на выходные параметры точности $\Delta r n$, начальных значений параметров геометрической точности и их изменения во времени, как отдельных элементов этих систем, так и их различных сочетаний.

В рамках принятого подхода предложена методика прогнозирования параметрической надежности технологических систем:

1) Определение структурного состава технологической системы (1) и вычисление полной вариации ее функции формообразования (2). Вычисление векторного баланса точности (3).

2) Задание (определение) множества обрабатываемых поверхностей {ОП} и требований к их точности. Вычисление скалярных балансов точности (4) для всего множества {ОП}. Преобразование скалярных балансов в размерные цепи (РЦ) [4].

3) Определение временных зависимостей и плотности вероятности изменения составляющих размерных цепей.

4) Построение моделей потери точности технологической системы по {ОП}.

5) Моделирование процесса потери точности для определения вероятности безотказной работы – прогнозирование параметрической надежности технологического оборудования.

Приведем пример реализации предложенной методики для токарного станка [7], обрабатывающего цилиндрические и торцовые поверхности.

Баланс нормальных погрешностей токарного станка при обработке цилиндрической поверхности имеет вид [5]:

$$\Delta r n_{\text{ц}} = \delta_{x0} \cos \varphi + \delta_{y0} \sin \varphi - \alpha_0 z \sin \varphi + \beta_0 z \cos \varphi + \beta_1 z + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi}, \quad (5)$$

где $\delta_{x0..3}$ – малые абсолютные смещения по оси OX обрабатываемой детали со шпинделем, станины, продольного суппорта и поперечного суппорта соответственно, мкм;

δ_{y0} – малое абсолютное смещение по оси OY обрабатываемой детали со шпинделем, мкм;

α_0 – малый угол поворота вокруг оси OX обрабатываемой детали со шпинделем, рад;

β_0 – малый угол поворота вокруг оси OY обрабатываемой детали со шпинделем, рад;

β_1 – малый угол поворота вокруг оси OY станины, рад;

z – длина обрабатываемого участка, мм.

Преобразованное уравнение баланса, т.е. уравнение РЦ токарного станка при обработке цилиндрической поверхности имеет вид:

$$T_{\text{ц}} = \sum_{i=0}^1 \beta_i z + \sum_{i=0}^3 \delta_{xi}. \quad (6)$$

При этом пусть изменение параметров геометрической точности станка имеет линейный закон [1,2]:

$$X = X_0 + \gamma t, \quad (7)$$

где X_0 – начальное значение параметра при $t = t_0$, мкм (рад);

γ – скорость изменения параметра, мкм (рад)/год;

t – время, ч.

Согласно статистическим данным ($N = 5000$ наблюдений), изменения параметров геометрической точности станка подчиняются нормальному закону.

Характеристики распределений значений параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики распределений параметров геометрической точности станка

Параметр	Среднее значение скорости изменения параметра, мкм (рад)/год	Стандартное отклонение скорости изменения параметра, мкм (рад)/год
β_0	2,0	0,50
β_1	3,0	0,40
β_2	4,0	0,40
δ_{x0}	2,5	0,20
δ_{x1}	2,8	0,35
δ_{x2}	2,0	0,25
δ_{x3}	3,2	0,15
δ_{z0}	2,4	0,14
δ_{z1}	2,1	0,16
δ_{z2}	3,5	0,20
δ_{z3}	3,3	0,21

Пусть при построении модели потери точности токарного станка по обрабатываемым цилиндрическим поверхностям возможны случаи, когда плотность распределения вероятности длин обрабатываемых цилиндрических поверхностей подчиняется:

а) равномерному закону распределения $f(z)=100$ мм (предельно допустимое значение $T_{ц}=8,8$ мкм);

б) нормальному закону распределения (со средним значением длины $z=80$ мм и стандартным отклонением $\sigma_z=5$ мкм; предельно допустимое значение $T_{ц}=8,8$ мкм).

Плотность вероятности скорости потери точности станка при обработке им цилиндрических поверхностей имеет вид:

$$f(\gamma_{пгт}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\gamma_{пгт}}} e^{-\frac{(\gamma_{пгт} - \gamma_{српгт})^2}{2\sigma_{\gamma_{пгт}}^2}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\gamma_{пгт}} = \sigma_{\gamma}$ – среднее квадратическое отклонение скорости процесса потери точности станка, мкм (рад);

$\gamma_{пгт}$ – сумма скоростей изменения параметров геометрической точности МРС, мкм (рад)/год: $\gamma_{пгт} = (\gamma_{\beta 0} + \gamma_{\beta 1})z + \sum_{i=0}^3 \gamma_{\delta xi}$;

$\gamma_{српгт}$ – сумма средних значений скоростей изменения параметров геометрической точности МРС, мкм (рад)/год: $\gamma_{српгт} = (\gamma_{ср\beta 0} + \gamma_{ср\beta 1})z + \sum_{i=0}^3 \gamma_{ср\delta xi}$;

γ_j – скорость изменения параметра геометрической точности станка, $j=\{\beta_0, \beta_1, \delta_{x0..3}\}$, мкм (рад)/год;

$\gamma_{срj}$ – средняя скорость изменения параметра геометрической точности станка, мкм (рад)/год.

Вероятность безотказной работы $P(T)$ станка определяется по формуле [1,2]:

$$P(T) = 0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left(\frac{X_{\max} - \gamma_{ср} T - X_0}{\sqrt{2}\sigma_{\gamma} T} \right), \quad (9)$$

где $\gamma_{ср}$ – среднее значение скорости изменения параметров геометрической точности станка, мкм (рад)/год;

T – срок службы МРС, ч;

$X_{\max}$ – предельно допустимое значение параметров, при котором наступает предельное состояние станка, мкм (рад).

Определенные по выражению (9) вероятности $P1(T)$ и $P2(T)$ безотказной работы токарного станка при обработке цилиндрических поверхностей для вариантов а) и б), соответственно, представлены на рисунке 1.

Баланс нормальных погрешностей токарно-винторезного станка при обработке поверхности плоского торца имеет вид [5]:

$$\Delta r_{n_T} = \alpha_0 x \sin \varphi - \beta_0 x \cos \varphi - (\beta_1 + \beta_2) x + \sum_{i=0}^3 \delta_{zi}, \quad (10)$$

где $\delta_{z0..3}$ – малые абсолютные смещения по оси OZ обрабатываемой детали со шпинделем, станины, продольного суппорта и поперечного суппорта соответственно, мкм;

β_2 – малый угол поворота вокруг оси OY продольного суппорта, рад;

x – радиус обрабатываемого торца, мм.

Уравнение РЦ токарного станка при обработке поверхности плоского торца имеет вид:

$$T_T = \sum_{i=0}^2 \beta_i x + \sum_{i=0}^3 \delta_{zi}. \quad (11)$$

Согласно тем же статистическим данным ($N = 5000$ наблюдений), изменения параметров геометрической точности станка при обработке торцовых поверхностей также подчиняются нормальному закону.

Характеристики распределений значений параметров представлены в таблице 1.

Пусть при построении модели потери точности токарного станка по обрабатываемым торцовым поверхностям возможны случаи, когда плотность распределения вероятности радиусов обрабатываемых поверхностей подчиняется:

а) равномерному закону распределения $f(x) = 50$ мм (предельно допустимое значение $T_T = 4,4$ мкм);

б) нормальному закону распределения (со средним значением радиуса $x = 30$ мм и стандартным отклонением $\sigma_x = 1$ мкм; предельно допустимое значение $T_T = 3,8$ мкм).

Плотность вероятности скорости потери точности токарного станка при обработке им торцовых поверхностей имеет вид (8), при этом:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{пгт}} &= \sum_{i=0}^2 \gamma_{\beta_i} x + \sum_{i=0}^3 \gamma_{\delta_{zi}}; \\ \gamma_{\text{српгт}} &= \sum_{i=0}^2 \gamma_{\text{ср}\beta_i} x + \sum_{i=0}^3 \gamma_{\text{ср}\delta_{zi}}; \\ j &= \{\beta_{0..2}, \delta_{z0..3}\}. \end{aligned}$$

Определенные по выражению (9) вероятности $P3(T)$ и $P4(T)$ безотказной работы токарного станка при обработке торцовых поверхностей для вариантов а) и б), соответственно, представлены на рисунке 2.

Из полученных результатов для данного примера следует, что при обработке деталей с заданными предельно допустимыми значениями T_T и $T_{\text{ц}}$ при любых значениях вероятности безотказной работы, параметрический отказ наступит при обработке торцовых поверхностей.

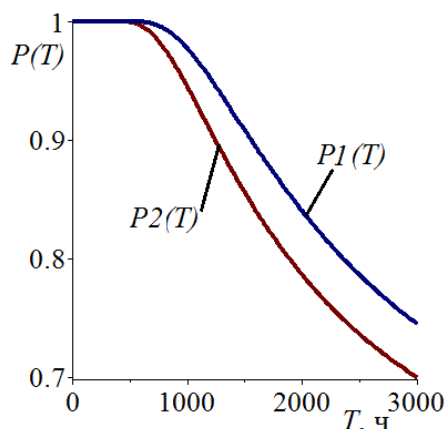


Рисунок 1 – Вероятность безотказной работы токарного станка при обработке цилиндрических поверхностей

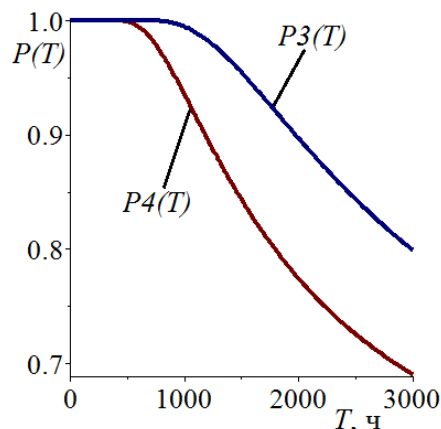


Рисунок 2 – Вероятность безотказной работы токарного станка при обработке торцовых поверхностей

Таким образом, в работе получена зависимость для расчета точности обработки деталей в технологических системах, а также предложена методика прогнозирования параметрической надежности технологических систем. Рассмотрен пример прогнозирования параметрической надежности токарного станка при обработке на нем цилиндрических и торцовых поверхностей. Успешная апробация предложенных зависимости и методики была выполнена на ОАО «Дальэнергомаш» г. Хабаровск.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1606.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
2. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров: ГОСТ 22267-76. – Введ. 01.01.88.
4. Аникеева О.В. Управление этапом планирования для повышения качества процесса ремонта металлорежущих станков: Автореферат ... к.т.н., спец. 05.02.23. Курск, 2012. 16 с.
5. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
6. Ивахненко, А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез А.Г. Ивахненко. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. – 124 с.
7. Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности: ГОСТ 18097-93 – Взамен ГОСТ 18097-88; введ. 01.07.1996.

Аникеева Олеся Владимировна

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Инженер кафедры управления качеством, метрологии и сертификации

Телефон: 8-908-123-86-24

E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

Ивахненко Александр Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством, метрологии и сертификации

Телефон: (4712) 32-61-00

E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Куц Вадим Васильевич

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Кандидат технических наук, доцент кафедры управления качеством, метрологии и сертификации

Телефон: (4712) 32-61-00

E-mail: kuc-vadim@yandex.ru

O.V. ANIKEEVA, A.G. IVAKHNENKO, V.V. KUTS

THE FORECASTING OF A PARAMETRIC RELIABILITY OF AN PRECISION PROCESS EQUIPMENT

In work the dependence for a calculation of a process systems precision is received. The technique of a process systems parametric reliability forecasting is offered. With the application of the offered technique the models of a no-failure operation probability of a turning-machine when processing on it cylindrical and face surfaces are constructed.

Keywords: forecasting; parametric reliability; process equipment.

BIBLIOGRAPHY

1. Pronikov, A.S. Nadezhnost' mashin / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 592 s.
2. Pronikov, A.S. Parametricheskaja nadezhnost' mashin / A.S. Pronikov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman, 2002. – 560 s.

3. Stanki metallovezhushhie. Shemy i sposoby izmerenij geometricheskikh parametrov: GOST 22267-76. – Vved. 01.01.88.
4. Anikeeva O.V. Upravlenie jetapom planirovaniya dlja povysheniya kachestva processa remonta metallovezhushhih stankov: Avtoreferat ... k.t.n., spec. 05.02.23. Kursk, 2012. 16 s.
5. Reshetov, D.N. Tochnost' metallovezhushhih stankov / D.N. Reshetov, V.T. Portman. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 336s.
6. Ivahnenko, A.G. Konceptual'noe proektirovanie metallovezhushhih sistem. Strukturnyj sintez A.G. Ivahnenko. – Habarovsk: Izd-vo Habar. gos. tehn. un-ta, 1998. – 124 s.
7. Stanki tokarno-vintoreznye i tokarnye. Osnovnye razmery. Normy tochnosti: GOST 18097-93 – Vzamen GOST 18097-88; vved. 01.07.1996.

Anikeeva Olesya Vladimirovna

Southwest State University, Kursk

The engineer of Quality Management, Metrology and Certification department

Tel. 8-908-123-86-24

E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

Ivakhnenko Alexander Gennadievich

Southwest State University, Kursk

PhD, Professor of Quality Management, Metrology and Certification department

Tel. (4712) 32-61-00

E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Kuts Vadim Vasilievich

Southwest State University, Kursk

PhD, Professor of Quality Management, Metrology and Certification department

Tel. (4712) 32-61-00

E-mail: kuc-vadim@yandex.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 иверху – 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.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

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, 55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 14.02.2012 г.
Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 10.
Тираж 600 экз.
Заказ № 225/13П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.