

Редакционная

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запонец Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шенбо, канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Азербайджан)

Мудлокин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Осачин В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

http://oreluniver.ru

E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-67029
от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018

Содержание

Секция «Теоретическая и прикладная механика»

Калинин М.И., Пашков Е.В., Гайнуллина Я.Н., Сосненко М.В. Разработка мультимодульных вертебрологических имплантов с упругими фиксирующими элементами	3
Копп В.Я., Балакин А.И. Анализ максимальной дифференциальной энтропии и дисперсии композиции случайных величин, сосредоточенных на конечных интервалах	9
Кушнарев Л.И., Кушнарев С.Л. К конкурентоспособности в технике через повышение качества	19
Коваль К.А., Сухоруков А.Л. Верификация численного метода расчета гидроупругих колебаний конструкций в потоке жидкости	24
Морева И.Н. Эффективность рулевого устройства	38
Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р. Методика расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубном пространстве судовых охладителей	42
Неменко А.В., Никитин М.М. Подавление колебаний при перемещении упруго-массовой системы	50
Ларин С.Н., Платонов В.И. Анализ изменения геометрии изделий при изотермическом свободном деформировании титановых сплавов в квадратную матрицу	57

Секция «Технологии и инструменты»

Богущий В.Б., Шрон Л.Б. Синтез механообрабатывающих модулей для ремонтного производства с учетом потока отказов ремонтируемых узлов и деталей	63
Заморёнов М.В. Имитационное моделирование процесса функционирования облачной системы репликации данных	70
Покинтелица Н.И., Левченко Е.А. Динамические явления процесса термофрикционного резания сталей	76
Полищев В.П., Полищев В.В. Автоматическая линия резки ленты на трансформаторные пластины	82
Анцев А.В. Управление надежностью режущего инструмента с учетом фактора случайности процесса резания	90
Воронцов А.Л., Тялина Д.А. Исследование комбинированного выдавливания стаканов с конической донной частью	103
Мухамедзянова А.А., Бейлина Н.Ю. О создании в России производства нефтяных коксов и пексов – прекурсоров углеродных композиционных материалов	109
Буркова Е.В., Бурков Д.В. Использование тепловых аккумуляторов солнечной энергии в условиях Крыма	117
Денисов М.С. Повышение физико-механических свойств поршней ДВС на основе автоматизации управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл	124
Куковинец О.С., Мурашова Р.Х., Сагитова А.Ф. Металлокомплексы на основе пектинов. Получение и свойства	135
Муравьев А.А., Тарпанов А.С. Особенности твердотельного моделирования цилиндрического зубчатого колеса с круговым зубом для изготовления по FDM технологии	141
Сухов А.К., Дологлоня А.В. Способы снижения радоновой активности в наземных и подземных объектах	147
Васильев И.А., Люминарская Е.С., Селиванов К.В. Гибридная энергетика как способ электрификации географически изолированных потребителей	154
Шарифуллин И.А., Сафронов Е.В., Носко А.Л., Потапов В.А. Стенд для ресурсных испытаний тормозных роликов гравитационных конвейеров	161
Федоровский К.Ю. Теплопередача через обшивку корпуса судна и особенности происходящих процессов	168
Филипович О.В. Модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов	173
Братан С.М., Владецкий Е.А., Харченко А.О. Моделирование процесса финишной обработки с учетом воздействий окружающей среды на технологическую систему через основание плавающей мастерской	179
Никифоров И.А. Исследование прямого выдавливания с использованием контрпунксона для изготовления стаканов с фланцем в донной части	187
Олейниченко Н.Н. Применение импульсных систем регулирования для повышения качества напряжения судовых синхронных генераторов	193
Липка В.М., Братан С.М., Рапацкий Ю.Л. Исследование надежности процесса накатывания наружных резьб с учетом взаимосвязанных отказов	198
Дологлоня А.В., Сухов А.К., Стаценко И.Н. Устройство изменения плавучести подводных аппаратов для глубоководных измерений	207

Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

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

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

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.

Member of editorial board:

Bukhach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Zubchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kopylov Yu.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shenbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Azerbaijan)

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzov V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030 Orel, Moskovskaya ul., 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

http://oreluniver.ru

E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

© Orel State University, 2018

Contents

Section «Theoretical and Applied Mechanics»

<i>Kalinin M.I., Pashkov E.V., Gainullina Ya.N., Sosnenko M.V.</i> Development of multimodal vertebral implants with elastic locking elements.....	3
<i>Kopp V.Ya., Balakin A.I.</i> The analysis of applicability of the composite law for measurements in machine and instrument building.....	9
<i>Kushnarev L.I., Kushnarev S.L.</i> To competitiveness in technology through improving the quality.....	19
<i>Koval K.A., Sukhorukov A.L.</i> Verification of the numerical method for calculation of construction hydroelastic oscillations in fluid flow.....	24
<i>Moreva I.N.</i> The efficiency of the rudder gear.....	38
<i>Ablaev A.R., Ablaev R.R.</i> Method of calculation of heat emission and hydraulic resistance in pipe cavity of ship coolers.....	42
<i>Nemenko A.V., Nikitin M.M.</i> Vibration suppression during massive flexible system movement.....	50
<i>Larin S.N., Platonov V.I.</i> Analysis of changing the geometry of products in the isothermal free deformation of titanium alloys in a square matrix.....	57

Section «Technologies and Tools»

<i>Bogutsky V.B., Shron L.B.</i> Synthesis of machining modules for repair manufacturing with the account the failure flow of separate units and parts which are provided for repair.....	63
<i>Zamoryonov M.V.</i> Imitation modeling of the process functioning cloud system of data replication.....	70
<i>Pokintelitsa N.I., Levchenko E.A.</i> Dynamic indicators of the process thermofriction steel cutting.....	76
<i>Polivcev V.P., Polivcev V.V.</i> Automatic line of tape cutting on transformer plates.....	82
<i>Antsev A.V.</i> Reliability management of the cutting tool considering randomness factor of cutting process.....	90
<i>Vorontsov A.L., Tyalina D.A.</i> The study of the combined extrusion of glasses with a conical bottom part.....	103
<i>Mukhamedzianova A.A.</i> About creation in Russia productions oil coke and pitches – precursors carbon composite materials.....	109
<i>Burkova E.V., Burkov D.V.</i> The use of heat accumulators of solar energy in Crimea.....	117
<i>Denisov M.S.</i> Improving the physical and mechanical properties pistons of the internal combustion engine based on the automation process of applying pressure on crystallizing metal.....	124
<i>Kukovinets O.S., Mudarisova R.Kh., Sagitova A.F.</i> Metal complexes based on pectin. Preparation and properties.....	135
<i>Muravev A.A., Tarapanov A.S.</i> Peculiarities of solid modeling cylindrical gear with circular tooth for production by FDM technology.....	141
<i>Sukhov A.K., Dologlonyan A.V.</i> Research of geometrical and physical parameters influence of the drift boat on its speed.....	147
<i>Vasilev I.A., Lyuminarskaja E.S., Selivanov K.V.</i> Hybrid energy as a method of electrification of geographically isolated consumers.....	154
<i>Sharifullin I.A., Safronov E.V., Nosko A.L., Potapov V.A.</i> Device for resource testing of brake rollers of gravity conveyors.....	161
<i>Fedorovskiy K.Yu.</i> Heat transfer through ship's shell plating and peculiarities of the processes.....	168
<i>Filipovich O.V.</i> The model of two-parameter selective assembly of two elements.....	173
<i>Bratan S.M., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.O.</i> Modeling of the process of finishing with the account of environmental impacts on the technological system through the basis of a floating workshop.....	179
<i>Nikiforov I.A.</i> Research of direct extrusion with use of the counterpunch for production of cups with the bottom flange.....	187
<i>Oleynichenko N.N.</i> The application of pulse control systems for improving the voltage quality of ship synchronous generators.....	193
<i>Lipka V.M., Bratan S.M., Rapatskiy Yu.L.</i> Investigation reliability of the process rolling outside threads with the account of interrelated failures.....	198
<i>Dologlonyan A.V., Suhov A.K., Stacenko I.N.</i> The device of change of buoyancy of undersea vehicle for deep-water measurements.....	207

СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА»

УДК 615.46:616.728

М.И. КАЛИНИН, Е.В. ПАШКОВ, Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА, М.В. СОСНЕНКО

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИМОДУЛЬНЫХ ВЕРТЕБРОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТОВ С УПРУГИМИ ФИКСИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Аннотация. Работа направлена на решение задач увеличения ресурса или периода «выживаемости» имплантируемых металлоконструкций предназначенных для обеспечения опорности и функциональности позвоночника человека. Для этого разработан ряд конструкций с упругими фиксирующими элементами, деформируемыми под действием следящих анатомических нагрузок. Анатомическая адаптация этих элементов позволяет существенно снизить напряжения в замыкательных пластинах тел позвонков, тем самым обеспечив длительный срок службы системы «имплант – позвонок».

Ключевые слова: упругие элементы, напряженно – деформированное состояние, имплант, позвоночник, биомеханика.

Введение.

Практика выполнения оперативных вмешательств в вертебродологии показывает, что механические свойства замыкательных пластинок тел позвонков могут существенно меняться и зависеть от множества различных фактов и обстоятельств. Некоторые дегенеративные заболевания позвоночника в течении года могут менять характеристики механической прочности тел позвонков в $10 \div 12$ раз, что крайне негативно влияет на вероятность переломов костных структур под действием компрессионных нагрузок. Большой клинический и практический интерес представляет механическое поведение костных структур при циклических деформациях и усталостных испытаниях, так как в реальных физиологических и анатомических условиях позвонки подвергаются именно таким периодическим нагрузкам. При длительных циклических нагружениях важнейшей характеристикой является усталостная долговечность элементов имплантируемых металлоконструкций [1] определяемая количеством циклов до разрушения нагружаемого элемента импланта таблица 1.

Таблица 1 – Зависимость усталостной долговечности от частоты нагружений и уровня напряжений.

Частота нагружения f , Гц	Уровень напряжений σ/σ^*	Усталостная долговечность $K \cdot 10^{-4}$, циклов
30	0,182	62 ± 18
	0,213	12 ± 10
	0,289	$1,5 \pm 0,5$
	0,341	$0,5 \pm 0,05$
60	0,171	95 ± 15
	0,199	$25 \pm 3,0$
	0,270	$2,5 \pm 0,5$
	0,319	$0,5 \pm 0,05$
125	0,159	135
	0,185	43
	0,252	4,5
	0,297	1,5

При проектировании имплантируемых биомеханических металлоконструкций для поясничного отдела позвоночника были приняты следующие допущения:

1) для замыкательных пластин и тел позвонков модуль упругости прямо пропорционален количеству плотной кортикальной кости в поперечном сечении опорных поверхностей;

2) осевые усилия распределены по сечению позвонка равномерно;

3) деформации представлены как малые величины;

4) модуль упругости E_c является функцией степени пористости позвонков;

следовательно модуль упругости может быть выражен в следующем виде:

$$E_c = E(1 - kP_v^{0,67}) \quad (1)$$

где E – базовый модуль упругости;

k – константа соотношения площади пор и их объема;

P_v – характеристика пористости структуры.

В допущении однородности распределения пор в объеме тел позвонков, модуль упругости может быть выражен как

$$E_c = E(1 - c)^2. \quad (2)$$

Следует учитывать анизотропность материала [3].

При проектировании геометрических и расчете прочностных характеристик фиксирующих элементов спинальных имплантов необходимо учитывать влияние минеральной плотности костных структур на держащую способность тел позвонков. На рисунке 1 представлена зависимость упомянутых характеристик от минеральной плотности кости в условиях как динамических так и статических нагрузений.

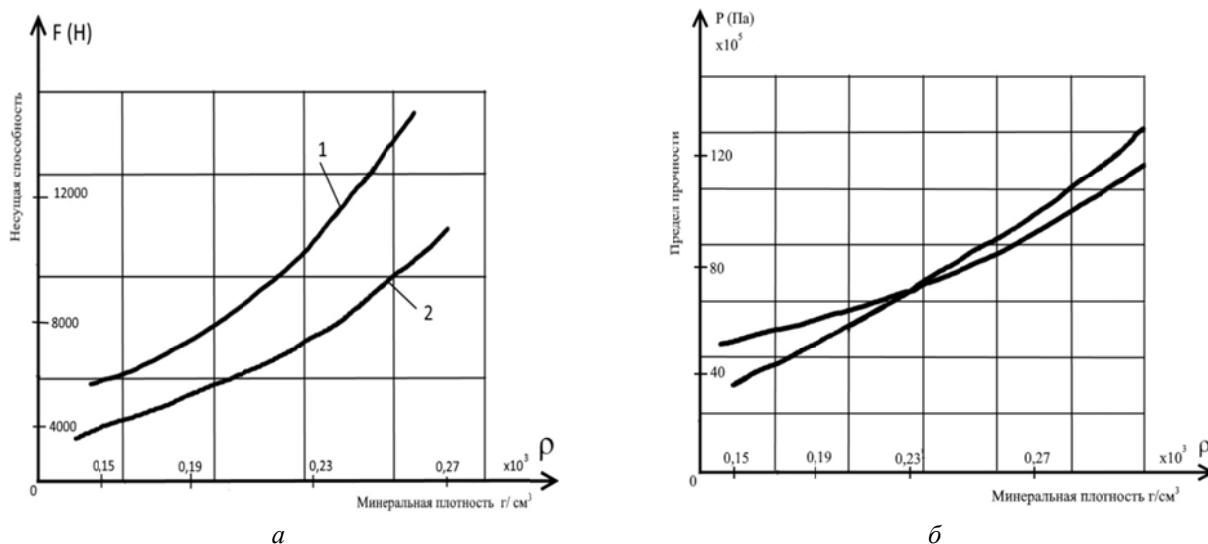


Рисунок 1 – Связь динамической (а) и статической (б) несущей способности с минеральной плотностью тел позвонков

Биомеханические характеристики, влияющие на устойчивость межпозвонковых дисков при действии функционально – анатомических нагрузок приведены в таблице 2.

В работе [2] приводятся данные, отображающие весьма значимую закономерность в динамике дегенеративно – дистрофического процесса поясничного отдела позвоночника, связанную с возрастом пациентов.

Таблица 2 – Устойчивости элементов позвоночника к осевому сжатию

№ п/п	Параметр	Уровень (поясничный отдел)				
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	Предельная сила, кН	10,6	11,8	12,7	13,0	12,9
2	Предельная деформация, мм	6,7	6,8	5,8	6,7	6,3

В таблице 3 приводятся данные по угловым перемещениям тел позвонков в пяти уровнях поясничного отдела позвоночника

Таблица 3 – Угловые перемещения тел позвонков

№ п/п	Параметр Уровень	Плоскость					
		Сагиттальная		Фронтальная		Горизонтальная	
		Диапа- зон	Характер- ная величина	Диапа- зон	Характер- ная величина	Диапа- зон	Характер- ная величина
1	$L_1 - L_2$	9 – 16	12	3 – 8	6	1 – 3	2
2	$L_2 - L_3$	11 – 18	14	3 – 9	6	1 – 3	2
3	$L_3 - L_4$	12 – 18	15	5 – 10	8	1 – 3	2
4	$L_4 - L_5$	14 – 21	17	5 – 7	6	1 – 3	2
5	$L_5 - S_1$	18 – 22	20	2 – 3	3	3 – 6	5

Расчет упруго – пластических характеристик фиксирующих элементов имплантируемых металлоконструкций необходимо выполнять с учетом таких механических характеристик межпозвонковых дисков как их жесткость при различных видах нагружений. Некоторые необходимые для этого данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Биомеханические характеристики межпозвонковых дисков [3].

№ п/п	Уровень дисков	Осевая жесткость, $H/м \cdot 10^6$	Жёсткость при скручивании, $H \cdot м \cdot 10^2$	Жёсткость при сгибании, $H \cdot м \cdot 10^2$	
				Сагиттальная плоскость	Фронтальная плоскость
1	$L_1 - L_2$	2,13	1,20	0,90	2,20
2	$L_2 - L_3$	2,0	1,20	0,90	2,19
3	$L_3 - L_4$	2,0	1,20	0,90	2,16
4	$L_4 - L_5$	1,87	1,10	0,80	1,81
5	$L_5 - S_1$	1,46	0,90	0,70	1,57

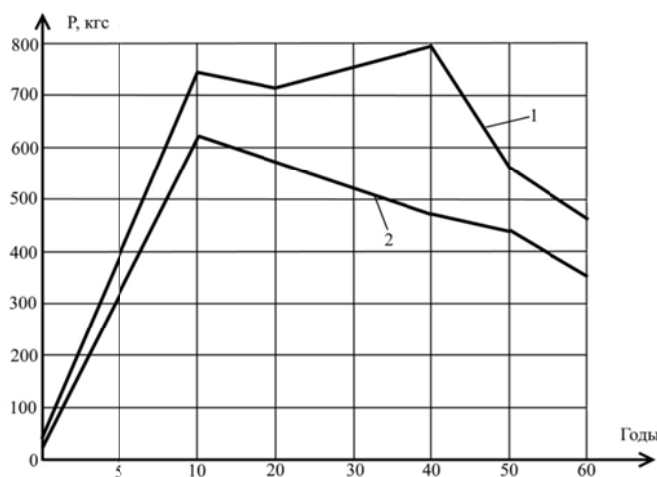
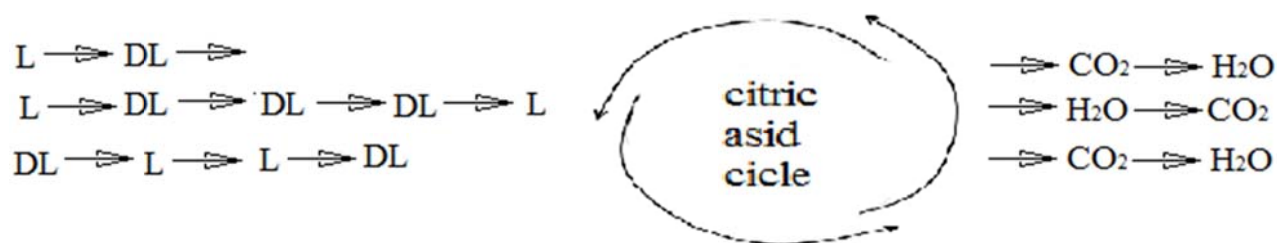


Рисунок 2 – Показатели межпозвонковых дисков: 1 – мужчины, 2 – женщины

Обобщение данных по эксплуатационным и физикомеханическим характеристикам имплантируемых материалов (металлов и сплавов) показало значительное расхождение рассматриваемых величин [4,5]. Применение различных типов полимерных материалов, таких как «хирулен» – сверх высокомолекулярный полиэтилен с перекрёстными связями, ТМС – триметиленкарбонат, ПEEK – полиэфирэфрикетон, D и L – полилактиды (биodeградируемые полимеры), так же не позволяет обеспечить в полной мере соответствие их свойств, свойствам спонгиозной и кортикальной костной ткани, а значит при одинаковых

условиях нагружения материалы работают не одинаково, что негативно влияет на срок службы имплантов в целом.

Наиболее продвинутые марки биodeградируемых полимеров, пока не нашли широкого применения в вертебрологии так как имеют высокую стоимость и нерегулируемый период разложения, не учитывающий такие факторы, как пол, возраст, структуру питания, экологическую ситуацию в районе проживания, физиологическую нагрузку и т.д [6,7]. Реакция деградации подобных полимеров, протекает по следующей схеме:



Таким образом, рассмотрев всё многообразие спинальных имплантов по материалам и конструктивному исполнению, можем считать, что все разновидности межтеловых имплантов, по сути являются абсолютно жесткими телами, а их фиксирующие элементы по этому критерию жесткости абсолютно не соответствуют упругим характеристикам замыкательных пластин позвонков [8].

С целью устранения вышеупомянутых недостатков в лаборатории биомеханики Севастопольского государственного университета на базе 20 летнего опыта исследований, проектирования и конструирования имплантируемых металлоконструкций для вертебрологии, травматологии, ортопедии и нейрохирургии, была разработана конструкция межтелового импланта для поясничного отдела позвоночника, устанавливаемая задним доступом (PLIF) методом малоинвазивного оперативного вмешательства [9,10]. Отличительной особенностью импланта (кейджа) является наличие поворотно – подвижных фиксирующих элементов, выполненных в виде дисков, обладающих требуемыми (расчётными) упругими свойствами. Фиксирующие диски выполняются из нового титанового сплава марки ТС–6, обладающего пружинными свойствами. Дисковые элементы имеют возможность упруго деформироваться во фронтальной плоскости, разгружая замыкательные пластины тел позвонков и предотвращения тем самым вероятность их разрушения. В тоже время, фиксирующие диски предотвращают миграцию кейджа относительно опорной поверхности позвонка. Диски работают в условиях малых перемещений, что позволяет обеспечить достаточно длительный срок службы.

Лаборатория биомеханики Севастопольского государственного университета располагает действующим 6-ти координатным испытательным стендом симулятором, позволяющим выполнить трибологические (ресурсные) испытания размерного ряда кейджей новой конструкции в соответствии с действующими стандартами ISO. Кроме упомянутых, новый имплант обладает еще целым рядом существенных отличительных конструктивных особенностей, что позволило авторам оформить заявку на получение патента РФ на изобретение. В настоящее время отрабатывается маршрутная технология производства нового поколения имплантов и предполагается производство ограниченной партии изделий (размерного ряда) для проведения клинических испытаний в специализированных медицинских центрах РФ. Определенным положительным моментом является то, что имплантация разработанного кейджа будет производится набором стандартного вертебрологического инструментария и не потребует создания и производства нового дорогостоящего комплекта хирургического инструмента. Опорные поверхности кейджа, контактирующие с замыкательными пластинами тел позвонков могут быть выполнены специальным образом, позволяющим значительно снизить компрессионные нагрузки в зоне межтелового промежутка и предотвратить протрузию импланта в тела позвонков. Боковые поверхности кейджа исключают травмирование нервного корешка в процессе оперативного вмешательства.

Выводы.

Появление на рынке биоинертных имплантируемых инновационных металлоконструкций выполненных из новых конструкционных материалов, таких как:

– полиэтилен ультравысокого молекулярного веса с поперечно – перекрёстными связями (торговая марка WIAM);

– нержавеющая сталь Fe Cr Ni Mo Mn ISO 5832/1 (ASTM 603);

– алюмооксидная керамика Al_2O_3 ISO 6474 (ASTM F75);

– нержавеющая сталь Fe Cr Ni Mo Mn Nb N – ISO 5832/9 (ASTM 648);

– титановый сплав TC – 6 ISO 5832\4 (ASTM 627),

положительно влияет на качество изделий медицинского назначения, однако существенное повышение их эксплуатационных свойств, главным из которых является срок службы – «выживаемость» импланта, невозможно без продуманных и экспериментально проверенных в лабораторных условиях, свойств фиксирующих элементов вышеупомянутых конструкций.

Приближение физико – механических свойств элементов имплантатов к свойствам костных структур позволит соблюсти принцип равнодолговечности и стандарты анатомической адаптации в период функционирования изделия и, значит, увеличит время до выполнения возможных ревизионных операций и даст возможность значительно повысить качество жизни пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелинейная теория тонкостенных оболочек и биомеханика // Труды I Всесоюзного симпозиума. – Кутаиси – Ткибули, 1985. – 507 с.
2. Калнберз, В.К. Биомеханика / В.К. Калнберз, Я.Я. Калнин. – Рига: Изд-во НИИ Травматологии и ортопедии, 1975. – 692 с.
3. Образцов, И.Ф. Проблемы прочности в биомеханике / И.Ф. Образцов. – М., Высшая школа, 1988. – 312 с.
4. Дубровский, В.И. Биомеханика / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова. – М., Изд-во Владоспресс, 2008. – 670 с.
5. Иголкин, А.И. Титан в медицине/ А.И. Иголкин. – Журнал «Титан», 1993. – 78 с.
6. Новиков, Н.В. Эндопротезы суставов человека: Материалы и технологии / Н.В. Новиков, О.А. Розенберг. – Киев: Изд-во Синописис, 2011. – 528 с.
7. Продан, А.И. Дегенеративные заболевания позвоночника / А.И. Продан, В.А. Радченко, Н.А. Корж. – Харьков: Том 1, 2007. – 272 с.
8. Бранков, Г. Основы биомеханики / Г. Бранков. – М., 1981. – 412 с.
9. Пат. 2626137 Российская Федерация, МПК А 61 F 2/44 (2006.01). Закрытый эндопротез межпозвонкового диска / Пашков Е.В., Калинин М.И., Поляков А.М., Евстигнеев М.П., Пашкова И.С., Брехов А.Н., Гайнуллина Я.Н.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СевГУ № 2015128372; заявлено 13.07.2015; опубл. 21.07.2017, Бюл. № 2.
10. Пат. 2646579 Российская Федерация, МПК А 61 F 2/44 (2006.01). Жидкостной спинальный эндопротез / Калинин М.И., Пашков Е.В., Поляков А.М., Гайнуллина Я.Н.; заявитель и патентообладатель СевГУ № 2015138637; заявлено 10.09.2015, опубл. 15.03.2018, Бюл. № 7.

Калинин Михаил Иванович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая механика и машиноведение»
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. +7(8692) 435–161
E-mail: kalininsev@mail.ru

Гайнуллина Яна Николаевна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
научный сотрудник лаборатории биомеханики
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. +7(8692) 545–023
E-mail: medeya-ru@yandex.ru

Пашков Евгений Валентинович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», доктор технических наук, профессор
кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов»
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. +7(8692)550–077
E-mail: pashkov@sevsu.ru

Сосненко Михаил Витальевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
студент 5 курса Политехнического института
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. +7(8692) 545–023
E-mail: sosnenko_mish@mail.ru

DEVELOPMENT OF MULTIMODAL VERTEBROLOGICAL IMPLANTS WITH ELASTIC LOCKING ELEMENTS

Abstract. *The work is aimed at solving the problems of increasing the resource or the period of "survival" implantable metal structures designed to provide support and functionality of the human spine. For this purpose, a number of structures with elastic locking elements deformable under the action of tracking anatomical loads have been developed. The anatomical adaptation of these elements allows to significantly reduce the voltage in the closing plates of the vertebral bodies, thereby ensuring a long service life of the "implant – vertebra" system.*

Keywords: *elastic elements, stress–strain state, implant, spine, biomechanics.*

BIBLIOGRAPHY

1. Nelineynaya teoriya tonkostennih obolochek i biomehanika // Trydi I Vsesouznogo simpoziuma/ – Kytai – Tkabyli, 1985. – 507 s.
2. Kalnberz, V.K. Biomehanika / V.K. Kalnberz. Ya.Ya. Kalnin. – Riga: Izd-vo NII Travmatologii i ortopedii, 1975. – 692 s
3. Obrazcov, I F. Problemi prochnosti v biomehanike / I.F. Obrazcov. – M., Viscshayacshkola, 1988. – 312 s.
4. Dybrovskiy, V.I. Biomehanika / V.I. Dybrovskiy, V.N. Fedorova. – M., Izd-vo Vladopress, 2008. – 670 s.
5. Igolkin, A.I. Titan v medicine / A.I. Igolkin. – Zyrrnal «Titan», 1993. – 78 s.
6. Novikov, N.V. Endoprotezi systavov cheloveka: Materiali I tehnologii / N.V. Novikov, O.A. Rozenberg. – Kiev: Izd-vo Sinopsis, 2011. – 528 s.
7. Prodan, A.I. Degenerativnie zabolevaniya pozvonochnika / A.I. Prodan, V.A. Radchenko, N.A. Korz. – Harkov: Tom 1, 2007. – 272 s.
8. Brankov, G. Osnovi biomehaniki / G. Brankov. – M., 1981. – 412 s.
9. Pat. 2626137 Rossiysrky Federaciya, MPK A61F 2/44 (2006.01). Zakritiy endoprotez mezpozvonkovogo diska / Pashkov E.V., Kalinin M.I., Polyakov A.M., Evstegneev M.P., Pashkova I.S., Brehov A.N., Gaynullina Ya.N.; zayavitel i patentoobladatel FGAOU VO SevGY № 2015128372; zayavleno 13.07.2015; opybl. 21.07.2017, Bul. № 2.
10. 9. Pat. 2646579 Rossiysrky Federaciya, MPK A 61 F 2/44 (2006.01). Zidkostnoy spinalniy endoprotez / Kalinin M.I., Pashkov E.V., Polyakov A.M., Gaynullina Ya.N.; zayavitel i patentoobladatel FGAOU VO SevGY № №2015138637 zayavleno 10.09.2015; opybl. 10.09.2015, Bul. № 7.

Kalinin Mikhail Ivanovich

Sevastopol State University,
Candidate of Tehnical Sciences, Associate Professor
of the Department «Technical Mechanics and
Engineering», Sevastopol, Str. University, 33,
tel. +7(8692) 435–161
E-mail: kalininsev@mail.ru

Gainullina Yana Nikolaevna

Sevastopol State University,
Scientist laboratory of biomechanics,
Sevastopol, Str. University, 33,
tel. +7(8692) 545–023
E-mail: medeya-ru@yandex.ru

Pashkov Yevgeny Valentinovich

Sevastopol State University,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
«Instrument Systems and automation of technological
processes» Sevastopol, Str. University, 33,
tel. +7(8692) 550–007
E-mail: pashkov@sevsu.ru

Sosnenko Mikhail Vitalievich

Sevastopol State University,
5th year student of the Polytechnic Institute,
Sevastopol, Str. University, 33,
tel. +7(8692) 545–023
E-mail: sosnenko_mish@mail.ru

В.Я. КОПП, А.И. БАЛАКИН

АНАЛИЗ МАКСИМАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ И ДИСПЕРСИИ КОМПОЗИЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, СОСРЕДОТОЧЕННЫХ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Аннотация. Рассматривается вопрос определения оптимального числа многократных измерений исходя из вида плотности распределения погрешности средства измерения. Приведен композиционный закон распределения случайных величин, обеспечивающий максимум дифференциальной энтропии. В частности, при выполнении определенных условий, он соответствует усеченному нормальному, равномерному и двумодальному законам. С использованием приведенного закона получены композиции случайных величин, сосредоточенных на конечных интервалах. Проведен анализ дифференциальной энтропии и дисперсии полученных законов. Показано, что что максимальной дифференциальной энтропией при заданной дисперсии на определенном интервале обладает усеченный нормальный закон распределения или их композиция, обеспечивающая значения плотности распределения для границ интервала равные нулю. Приведены результаты моделирования, позволяющие оценить правильность сделанных выводов.

Ключевые слова: композиционный закон, неопределенность, дифференциальная энтропия, повышение точности измерений.

Введение.

Повышение качества деталей возможно при уменьшении погрешности измерения, что позволит ужесточить требования к допускаемой погрешности измерения и обеспечить изготовление их по более жестким допускам. На сегодняшний момент методы повышения точности измерений применяемые в производстве, приведены в рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 64–2003 «ГСИ. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений» [1]. Одним из указанных методов повышения точности измерений является метод многократных измерений не требующий использования более точных устройств.

В настоящее время наряду с классическими методами оценки погрешности средств измерения, зафиксированных в современных ГОСТах, широко применяются информационные методы [2, 3], связанные с понятием энтропии. Погрешность измерений представляет собой непрерывную случайную величину (СВ), при этом дифференциальная энтропия является оценкой ее неопределенности.

Целью статьи является анализ максимальной дифференциальной энтропии и дисперсии композиции случайных величин, сосредоточенных на конечных интервалах, и сравнение полученных данных с уже известными законами распределения.

При измерениях неопределенность (погрешность) рассчитывается на основе функции или плотности распределения случайной величины, представляющей собой погрешность измерения. Определение соответствующей функции или плотности распределения в особенности при многократных измерениях представляет собой достаточно сложную задачу. В литературе связанной с анализом точности средств измерений (СИ), например, в [5 – 15] вопросам определения закона распределения погрешностей уделяется большое внимание. В теории измерений широко распространены нормальный, равномерный, треугольный (Симпсона) и трапециидальный законы, а также закон арксинуса [4, 16 – 18].

В статье предлагается использовать закон распределения случайной величины, имеющей ограничения на пределы ее изменения при известных математическом ожидании и дисперсии, обеспечивающий максимум дифференциальной энтропии.

Следует отметить, что сама предельная погрешность средств измерения при многократных измерениях не меняется, а происходит уменьшение в n -раз дисперсии погрешности результата измерений, где n – число многократных измерений. При этом увеличение числа измерений приводит к увеличению времени выполнения контрольных операций и в конечном счете снижает производительность. Таким образом число измерений должно быть минимально необходимым для обеспечения требуемой точности измерений.

Доверительная вероятность P_δ качества измерения задается разработчиком, исходя из вида и устойчивости технологического процесса и метрологических характеристик средств измерения. Искомая плотность $p(x)$ распределения может быть определена на основе принципа максимума дифференциальной энтропии случайной величины (для наихудшего случая), которой является погрешность прибора, используя принцип максимума энтропии Джейнса [19]. Пользуясь выражением [20, 21]

$$n = \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2},$$

можно получить граничную оценку необходимого числа измерений исходя из вида плотности распределения случайной величины. Здесь σ^2 – дисперсия средства измерения; ε^2 – требуемое значения верности при заданной доверительной вероятности P_δ . Фактически ε^2 является требуемой дисперсией средства измерения после измерений.

Требуемое значение верности ε^2 определяется по найденному виду плотности $p(x)$ распределения и доверительной вероятности P_δ . Это осуществляется с использованием метода последовательных приближений следующим образом. Задаётся ε^2 и решается рассматриваемая ниже задача определения вида плотности $p(x)$ распределения случайной величины, которой является погрешность прибора. Вид плотности распределения выбирается из условия обеспечения максимума дифференциальной энтропии указанной случайной величины, дисперсия которой равна ε^2 . Далее по найденной плотности $p(x)$ определяется вероятность P_δ выхода результата измерения за границу поля допуска и сравнивается с заданным значением P_δ . Если $P_\delta > P_\delta$, то ε^2 уменьшается и вновь решается указанная задача. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено указанное условие. После того, как ε^2 найдено, определяется число многократных измерений.

Рассмотрим определение плотности распределения случайной величины, сосредоточенной на конечном интервале при заданных ее математическом ожидании и дисперсии.

Математическая постановка задачи с учетом условия, что x не является центрированной случайной величиной ($m_x \neq 0$), имеет вид:

определить плотность $p(x)$, доставляющую экстремум функционалу

$$\max_{p(x)} \rightarrow \left\{ H_{\text{diff}}(x) = - \int_a^b p(x) \cdot \ln p(x) dx \right\}, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\int_a^b p(x) dx = 1; \quad (2)$$

$$\int_a^b x p(x) dx = m_x = m_x; \quad (3)$$

$$\int_a^b (x - m_x)^2 p(x) dx = \varepsilon^2. \quad (4)$$

Составляя уравнение Эйлера для функционала (1) при ограничениях (2), (3), (4), получим

$$-\ln p(x) - 1 + \lambda'_1 + \lambda'_2 (x - m_x)^2 + \lambda'_3 x = 0.$$

Введя обозначения $\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda'_2 m_x^2$; $\lambda_3 = \lambda'_3 - 2\lambda'_2 m_x$, запишем последнее выражение в следующем виде:

$$-\ln p(x) - 1 + \lambda_1 + \lambda_2 x^2 + \lambda_3 x = 0. \quad (5)$$

Решая (5) получим:

$$p(x) = e^{\lambda_1 - 1} \cdot e^{\lambda_2 x^2 + \lambda_3 x} = e^{\lambda_2 x^2 + \lambda_3 x + \lambda_1 - 1} = e^{\lambda_1 - 1} \cdot e^{\lambda_2 x^2 + \lambda_3 x}, \quad -a \leq x \leq b \quad (6)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – множители Лагранжа.

Они численно определяются из условий (2), (3), (4) при подстановке в них (6), m_3 и ε^2 заданные математическое ожидание и дисперсия случайной величины.

Выражение (6) лежит в основе теоремы о композиционном законе распределения случайной величины, сосредоточенной на конечном интервале и при заданной дисперсии, обеспечивающей максимум дифференциальной энтропии подробный вывод которой дан в [22].

Теорема. Если случайная величина ограничена конечными пределами $[a, b]$, то при заданных ее математическом ожидании m_3 и дисперсии ε^2 максимальную дифференциальную энтропию обеспечивает композиционный закон распределения этой случайной величины вида

$$\begin{cases} 0, & x < a \\ p(x) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}; & \varepsilon^2 < \frac{(b-a)^2}{12}; \quad \lambda_2 < 0; \quad a \leq x \leq b; \\ p(x) = \frac{1}{b-a}; & \varepsilon^2 = \frac{(b-a)^2}{12}; \quad \lambda_2 = 0; \quad a \leq x \leq b; \\ p(x) = M e^{\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}; & \varepsilon^2 > \frac{(b-a)^2}{12}; \quad \lambda_2 > 0; \quad a \leq x \leq b; \\ 0, & x > b. \end{cases} \quad (7)$$

при этом если дисперсия $\varepsilon^2 > \frac{(b-a)^2}{12}$ он является двумодальным, если дисперсия

$\varepsilon^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$ – равномерным, а если дисперсия $\varepsilon^2 < \frac{(b-a)^2}{12}$ – усеченным нормальным законом, образующимся из не усеченного, математическое ожидание m и среднеквадратическое отклонение σ которого определяются из выражений

$$m_3 = m + \frac{C\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(a-m)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(b-m)^2}{2\sigma^2}} \right]; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 = \sigma^2 & \left\{ 1 + \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[(a-m) e^{-\frac{(a-m)^2}{2\sigma^2}} - (b-m) e^{-\frac{(b-m)^2}{2\sigma^2}} \right] \right\} + \\ & + 2m \frac{C\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(a-m)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(b-m)^2}{2\sigma^2}} \right] + m^2 + m_3^2, \end{aligned} \quad (9)$$

а максимальное значение дифференциальной энтропии при $\varepsilon^2 < \frac{(b-a)^2}{12}$ равно:

$$H_{\text{диф max}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[(a+m) e^{-\frac{(a-m)^2}{2\sigma^2}} - (b+m) e^{-\frac{(b-m)^2}{2\sigma^2}} \right] \right\} + \frac{m^2}{\sigma^2} - \frac{m m_3}{\sigma^2} - \ln \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

Если $\varepsilon^2 > \frac{(b-a)^2}{12}$ то в предыдущем выражении константа $\frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ заменяется на M .

В[22] дано также следствие из теоремы, которое здесь не приводится.

Результаты моделирования для случайных величин, лежащих в пределах $[-1,1]$ показаны на рисунке 1:

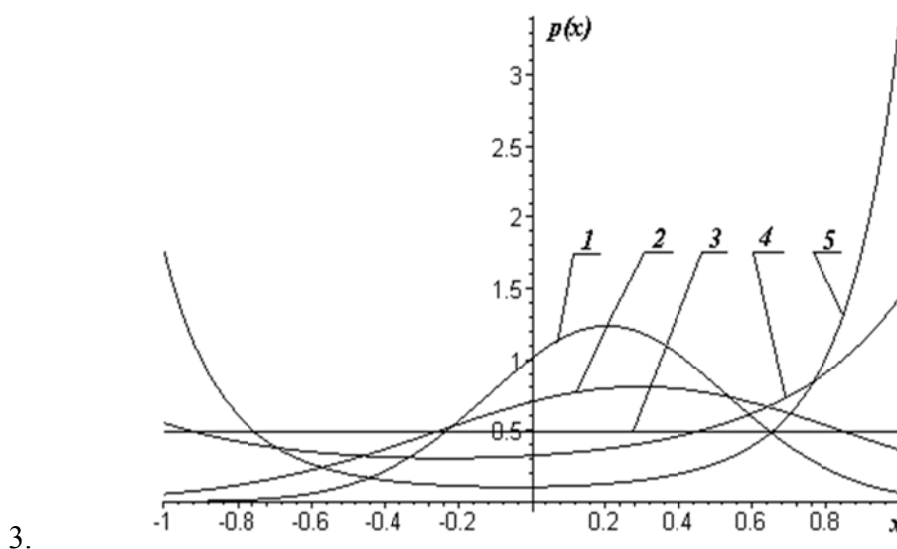


Рисунок 1 – Вид плотностей распределения при математическом ожидании $m_3 = 0.2$ в зависимости от значений дисперсии:

$$1 - \varepsilon^2 = 0,1; 2 - \varepsilon^2 = 0,2; 3 - \varepsilon^2 = 0,333; 4 - \varepsilon^2 = 0,4; 5 - \varepsilon^2 = 0,6$$

Значения констант для кривых равны: кривая 1 – $e^{\lambda_1-1} = 1,011$; $\lambda_2 = -4,743$; $\lambda_3 = 1,958$; кривая 2 – $e^{\lambda_1-1} = 0,701$; $\lambda_2 = -1,613$; $\lambda_3 = 0,954$; кривая 3 – $e^{\lambda_1-1} = 0,487$; $\lambda_2 = 0$; $\lambda_3 = 0$; кривая 4 – $e^{\lambda_1-1} = 0,323$; $\lambda_2 = +1,013$; $\lambda_3 = 0,4775$; кривая 5 – $e^{\lambda_1-1} = 0,1032$; $\lambda_2 = +3,158$; $\lambda_3 = 0,3207$.

На рисунке 1 кривые 1, 2 соответствуют усеченному нормальному закону распределения, 3 – равномерному, а 4, 5 – двумодальному.

Проведенные экспериментальные исследования на двух типах средств измерений: с индуктивным преобразователем и растровым фотоэлектрическим преобразователем, подтвердили, что закон распределения их погрешностей соответствует усеченному нормальному [23]. Этот случай обеспечивается при $\lambda_2 < 0$.

Полученный композиционный закон является довольно универсальным. Как отмечалось выше наиболее широкое распространение получили нормальный, равномерный, треугольный (Симпсона) и трапециидальный законы, а также закон арксинуса. Используя композиционный закон можно получить все эти законы. Нормальный закон получается из композиционного при условиях $a = -\infty$, $b = \infty$; равномерный при $\lambda_2 = 0$; закон близкий к закону арксинуса реализуется при $\lambda_2 > 0$, рисунок 1. При сложении случайных величин, распределенных по рассматриваемому закону при условии, что $\lambda_2 = 0$, в зависимости от выбора границ интервала $[a, b]$ получаются либо трапециидальный закон, либо треугольный закон Симпсона. Закон, обеспечивающий максимум дифференциальной энтропии при композиции случайных величин, сосредоточенных на одинаковых конечных интервалах рассмотрен в [24]. Плотность распределения полученной случайной величины имеет вид:

$$p(x_{cp}) = \begin{cases} (n+1) \int_{-a}^{(n+1)x-n \cdot a} p_n((n+1)x-y) \cdot p_1(y) dy; & x \in \left(-a; \frac{b-(n+1) \cdot a}{n+1}\right) \\ (n+1) \int_{-a}^b p_n((n+1)x-y) \cdot p_1(y) dy; & x \in \left(\frac{b-(n+1) \cdot a}{n+1}; \frac{n \cdot b-a}{n+1}\right), \\ (n+1) \int_{(n+1)x-n \cdot b}^b p_{n-1}((n+1)x-y) \cdot p_1(y) dy; & x \in \left(\frac{n \cdot b-a}{n+1}; b\right) \end{cases}$$

где n – число измерений.

Особенностью этого закона является то, что в отличие от усеченного нормального значение плотности распределения для границ интервала $[a, b]$ равны нулю.

Проанализируем СВ, получаемые путем композиции различных законов распределения СВ, сосредоточенных на конечных интервалах. Сравним значение энтропий и дисперсий полученных законов. В качестве исходных законов, входящих в композицию, будем использовать композиционный закон полученный ранее.

Случай 1. Рассмотрим сумму двух усеченных нормальных законов со следующими параметрами: интервалы сосредоточения первой СВ $a = -1, b = 1$, второй СВ $c = -1, e = 1$; дисперсии соответственно равны $d_1 = 0,1, d_2 = 0,1$. В результате моделирования получены следующие значения композиции СВ: дисперсия $d = 0,1999$, дифференциальная энтропия $H_{\text{диф}} = 0,6141$. График плотности распределения приведен на рисунке 2.

Случай 2. Рассмотрим следующий закон с параметрами $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,18, d_2 = 0,02$. В этом случае, также осуществляется операция свертки двух усеченных нормальных законов распределения, обеспечивающих требуемую дисперсию на заданном интервале. В результате моделирования получили $d = 0,2, H_{\text{диф}} = 0,6061$. Плотность распределения полученного закона приведена на рисунке 3.

Случай 3. Рассмотрим композицию усеченного нормального и двумодального законов с параметрами $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,1, d_2 = 0,4$. В результате получим $d = 0,4999, H_{\text{диф}} = 1,02955$. График плотности распределения приведен на рисунке 4. Как видно из рисунка закон распределения СВ получился двумодальный.

Случай 4. Рассмотрим следующую композицию СВ обеспечивающих дисперсию 0,5 на интервале $[-2; 2]$, представленную в виде свертки двух усеченных нормальных законов с параметрами $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,25, d_2 = 0,25$. В результате получим $d = 0,4999, H_{\text{диф}} = 1,0638$. График плотности распределения приведен на рисунке 5. На графике явно виден излом точки максимума.

Случай 5. Далее рассмотрим композицию равномерного и усеченного нормального законов, также обеспечивающую дисперсию 0,5 на интервале $[-2; 2]$. Исходные данные следующие $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,333, d_2 = 0,167$. Результаты моделирования $d = 0,4999, H_{\text{диф}} = 1,0587$. График плотности распределения приведен на рисунке 6. На графике явно виден излом точки максимума.

Случай 6. Исходные данные для следующего случая $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,4, d_2 = 0,4$. Исходные законы являются двумодальными. Результаты моделирования $d = 0,7999, H_{\text{диф}} = 1,2612$. График плотности распределения приведен на рисунке 7. На графике явно виден излом точки максимума, при этом он является более резким по сравнению со случаями 4, 5.

Случай 7. Композиция двумодального и усеченного нормального законов при заданных параметрах $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,5, d_2 = 0,3$ дает следующий результат $d = 0,7998, H_{\text{диф}} = 1,2638$. График плотности распределения приведен на рисунке 8.

Случай 8. Плотность распределения композиции двух равномерных законов с разными пределами с параметрами $a = -1,45, b = 1,45, c = -0,55, e = 0,55, d_1 = 0,7008, d_2 = 0,1008$ приведена на рисунке 9. Дисперсия и дифференциальная энтропия соответственно равны $d = 0,7979, H_{\text{диф}} = 1,2531$.

Случай 9. Исходные данные для следующего случая $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d_1 = 0,333, d_2 = 0,333$. Исходные законы являются равномерными. Результаты

моделирования следующие $d = 0,6658, H_{\text{диф}} = 1,192$. График плотности распределения приведен на рисунке 10.

Случай 10. Исходные данные для следующего случая $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,4, d2 = 0,26$. Исходные законы двумодальный и усеченный нормальный. Результаты моделирования следующие $d = 0,6599, H_{\text{диф}} = 1,1879$. График плотности распределения приведен на рисунке 11.

Случай 11. Далее рассмотрим композицию равномерных законов на интервале $[-1;1]$. Исходные данные следующие $a = -0,5, b = 0,5, c = -0,5, e = 0,5, d1 = 0,0833, d2 = 0,0833$. Результаты моделирования $d = 0,1665, H_{\text{диф}} = 0,4998$. График плотности распределения приведен на рисунке 12.

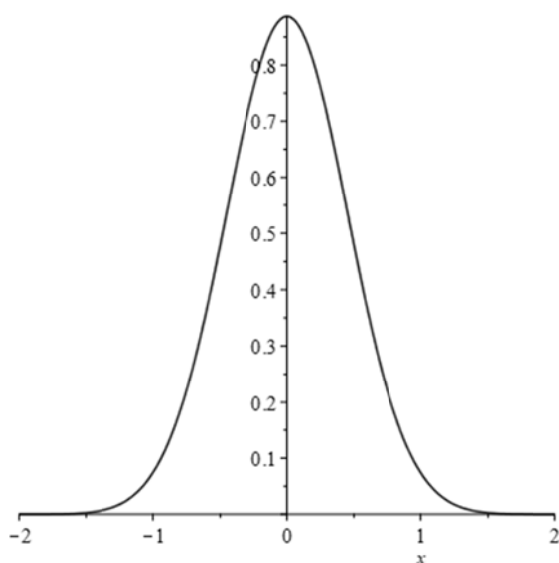


Рисунок 2 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 1):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,1, d2 = 0,1$

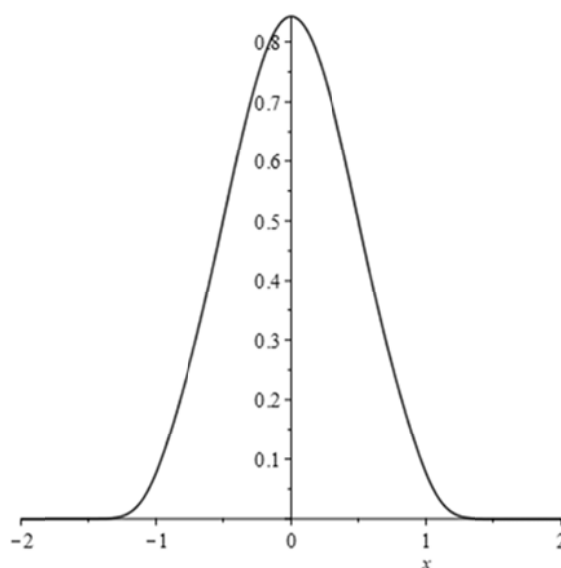


Рисунок 3 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 2):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,18, d2 = 0,02$

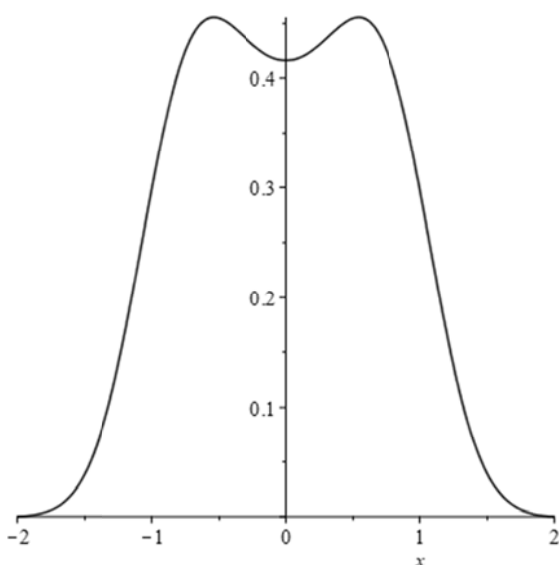


Рисунок 4 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 3):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,1, d2 = 0,4$

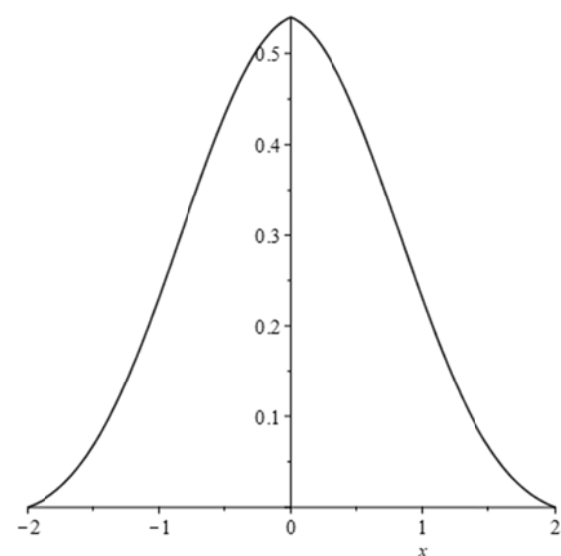


Рисунок 5 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 4):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,25, d2 = 0,25$

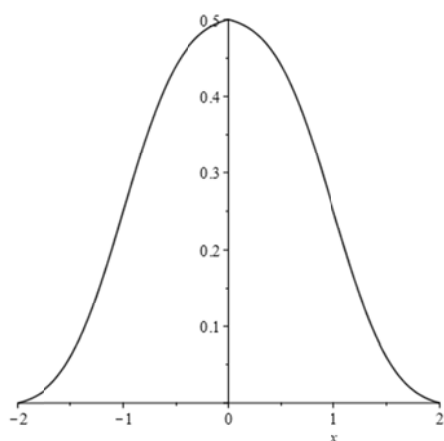


Рисунок 6 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 5):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,333, d2 = 0,167$

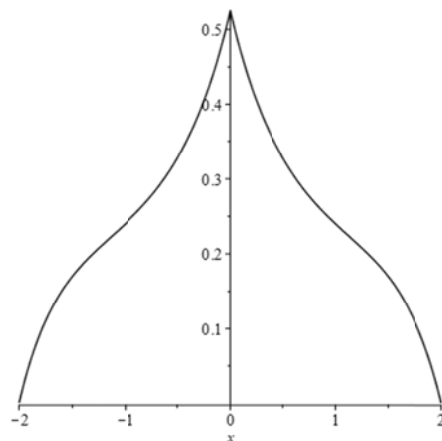


Рисунок 7 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 6):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,4, d2 = 0,4$

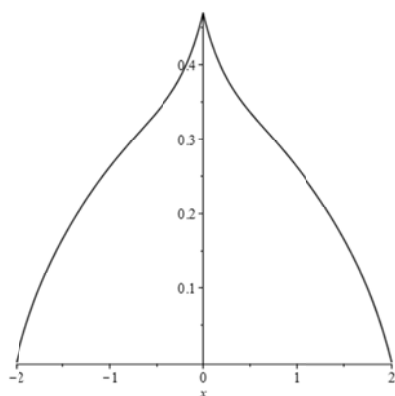


Рисунок 8 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 7):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,5, d2 = 0,3$

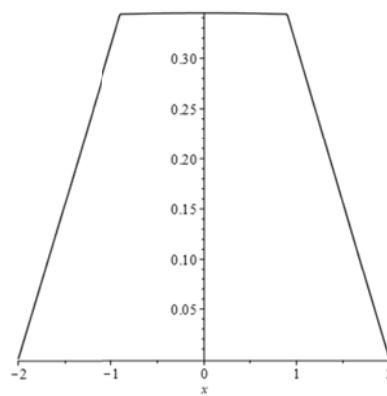


Рисунок 9 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 8):
 $a = -1,45, b = 1,45, c = -0,55, e = 0,55, d1 = 0,7008, d2 = 0,1008$

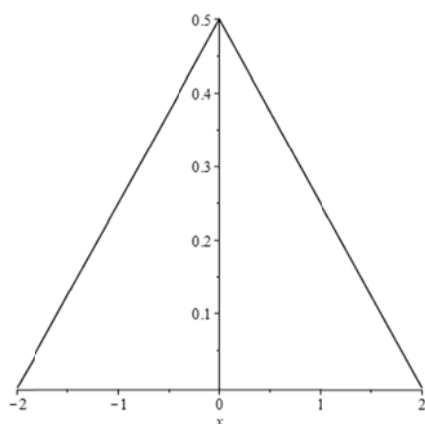


Рисунок 10 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 9):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,333, d2 = 0,333$

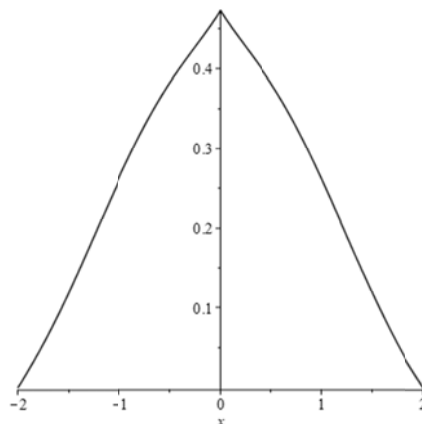


Рисунок 11 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 10):
 $a = -1, b = 1, c = -1, e = 1, d1 = 0,4, d2 = 0,26$

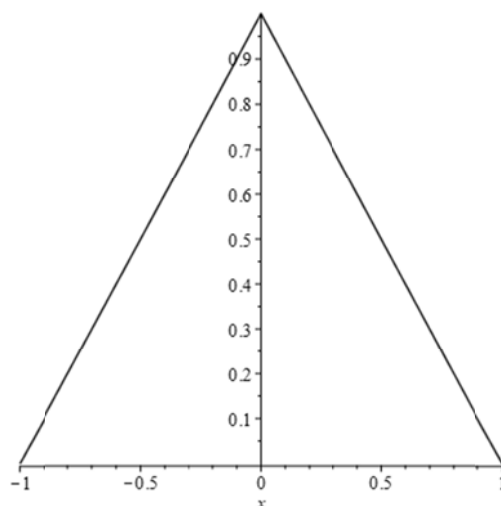


Рисунок 12 – Плотность распределения композиции случайных величин, ограниченных конечными пределами (случай 11):

$$a = -0,5, \quad b = 0,5, \quad c = -0,5, \quad e = 0,5, \quad d1 = 0,0833, \quad d2 = 0,0833$$

Выводы.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что с использованием полученного композиционного закона распределения СВ обеспечивающего максимум дисперсии можно получить любой из законов распределения погрешностей, используемых на практике. Проведенные исследования также показывают, что максимальной дифференциальной энтропией при заданной дисперсии на определенном интервале обладает усеченный нормальный закон распределения или их композиция, обеспечивающая значения плотности распределения для границ интервала равные нулю.

Одной из причин, сдерживающей широкое использование универсальности композиционного закона, является отсутствие в паспорте средства измерений информации о дисперсии его погрешности. В принципе этот недостаток легко может быть устранен метрологическими службами предприятий эксплуатирующих средства измерения. Для этого необходимо протестировать приборы с целью определения дисперсии их погрешности.

В качестве дальнейших исследований будет являться анализ применимости полученного закона распределения в различных областях механосборочного производства в машино–приборостроении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта №18–48–920014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 64–2003 «ГСИ. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений»
2. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств /П.В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
3. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2–е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд–ние, 1991.
4. Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенности в измерениях: Практическое пособие/Н.Ю. Ефремова. – Мн.: БелГИМ, 2003. – 50 с.
5. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1976.– 312с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Вентцель Е.С., Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988.– 480с.
7. Вострокнутов Н.Г. Информационно – измерительная техника / Н.Г. Вострокнутов, Н.Н. Евтихийев. – М.: Высш. шк., 1977.– 232с.
- 8.Кемпинский М.М. Точность и надежность измерительных приборов / Кемпинский М.М. – Л.: Машиностроение, 1972.– 264с.
9. Коротков В.П. Основы метрологии и точности механизмов приборов / В.П.Коротков, Б.А. Тайц. – М.: Изд–во машиностроительной литературы, 1961.– 400с.

10. Мокров Ю.В. Метрология, стандартизация, сертификация. [Учеб. пособ.] / Мокров Ю.В. – Дубна, 2007. – 132с.
11. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели / Назаров Н.Г. – М.: «Высшая школа», 2002. – 318с.
12. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / Орнатский П.П. – К.: Вища школа, 1983. – 455с.
13. Полишко С.П. Точность средств измерений / С.П. Полишко, А.Д. Турбенко. – К.: Вища школа, 1988. – 149с.
14. Рудзит Я.А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Я.А. Рудзит, В.Н. Плуталов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304с.
15. Сурикова Е.И. Погрешности приборов и измерений / Сурикова Е.И. – Л. Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. – 160с.
16. Гаврилов Л.Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Л.Н. Гаврилов Н.А. Бородачев, Р.М. Абрашитов. – М.: Машиностроение, 1973. – 567с.
17. Бруевич. Н.Г. Основы теории точности механизмов: монография / Н.Г. Бруевич, Е.А. Правоторова, В.И. Сергеев. – М.: Наука, 1988.
18. Фундаментальные проблемы теории точности. Коллектив авторов / Под ред. В.П. Булатова, И.Г. Фридлендера. — СПб.: Наука, 2001. — 504 с.
19. Джейнс Э.Т. О логическом обосновании методов максимальной энтропии/ Э.Т. Джейнс // Труды института инженеров по электротехнике и электронике, т. 70, №9, 1982, С. 33–51.
20. Копп В.Я. Определение граничной оценки числа многократных двухпараметрических измерений на основе анализа дифференциальной энтропии / В.Я. Копп, А.И. Балакин, О.В. Филипповичи и др. // Вестник СевНТУ № 83. – Севастополь, 2007. – С.168–171.
21. Копп В.Я. Информационный анализ диапазонов измерений / В.Я. Копп, А.А. Скидан, В.М. Шарапов и др. // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. Вып.10. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 196 – 199.
22. Копп В.Я. Анализ дифференциальной энтропии при технических измерениях в Машино-приборостроении / В.Я. Копп, А.А. Скидан, А.И. Балакин, О.В. Филиппович // "Труды Одесского политехнического университета" научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам – выпуск 1(27) Одесса 2007. –С.214–218.
23. Копп В.Я., Скидан А.А., Васютенко А.П. Оптимальная оценка числа измерений приборных систем // Вестник СевНТУ. Вып. 36: Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – С. 75 – 80.
24. Копп В.Я. Использование принципа максимума энтропии при оценке требуемого числа измерений для приборных систем / В.Я. Копп, А.И. Балакин, Е.А. Чуйко, М.В. Загорёнов // Технологічний комплекс: науковий журнал. – Луцьк, 2013. – №2(28). – С.52 – 58.

Копп Вадим Яковлевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольского государственного университета
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. 55-00-77
 E-mail: v_kopp@mail.ru

Балакин Алексей Игоревич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольского государственного университета
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. 55-00-77
 E-mail: AIBalakin@sevsu.ru

V.Ya. KOPP, A.I. BALAKIN

THE ANALYSIS OF APPLICABILITY OF THE COMPOSITE LAW FOR MEASUREMENTS IN MACHINE AND INSTRUMENT BUILDING

Abstract. *The problem of determining the optimal number of multiple measurements is considered based on the form of the error distribution density of the measuring instrument. The compositional law of distribution of random variables, providing a maximum of differential entropy, is given. In particular, under certain conditions, it corresponds to truncated normal, uniform and bimodal laws. Using the above law, we obtain compositions of random variables concentrated on finite intervals. The analysis of differential entropy and dispersion of the obtained laws is carried out. It is shown that the maximum differential entropy for a given dispersion over a certain interval has a truncated normal distribution law or their composition that ensures values of the distribution density for the boundaries of the interval equal to zero. The results of modeling are given, allowing to estimate the correctness of the conclusions made.*

Keywords: *composite law, uncertainty, differential entropy, increase of measurement accuracy.*

BIBLIOGRAPHY

1. RMG 64–2003 «GSI. Obespecheniye effektivnosti pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Metody i sposoby povysheniya tochnosti izmereniy»
2. Novitskiy P.V. Osnovy informatsionnoy teorii izmeritelnykh ustroystv / P.V. Novitskiy. – L.: Energiya, 1968. – 248 s.
3. Novitskiy, P.V. Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy / P.V. Novitskiy, I.A. Zograf. – 2–ye izd., pererab. i dop. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd–niye, 1991.
4. Yefremova N.YU. Otsenka neopredelennosti v izmereniyakh: Prakticheskoye posobiye/N.YU. Yefremova. – Mn.: BelGIM, 2003. – 50 s.
5. Braslavskiy D.A. Tochnost izmeritelnykh ustroystv / D.A. Braslavskiy, V.V. Petrov. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 312 s.
6. Venttsel Ye.S. Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya / Venttsel Ye.S., L.A. Ovcharov. – M.: Nauka, 1988. – 480 s.
7. Vostroknutov N.G. Informatsionno – izmeritelnaya tekhnika / N.G. Vostroknutov, N.N. Yevtikhiyev. – M.: Vyssh. shk., 1977. – 232s.
8. Kempinskiy M.M. Tochnost i nadezhnost izmeritelnykh priborov / Kempinskiy M.M. – L.: Mashinostroyeniye, 1972. – 264s.
9. Korotkov V.P. Osnovy metrologii i tochnosti mekhanizmov priborov / V.P. Korotkov, B.A. Tayts. – M.: Izd–vo mashinostroitelnoy literatury, 1961. – 400s.
10. Mokrov YU.V. Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya. [Ucheb. posob.] / Mokrov YU.V. – Dubna, 2007. – 132s.
11. Nazarov N.G. Metrologiya. Osnovnyye ponyatiya i matematicheskiye modeli / Nazarov N.G. – M.: «Vysshaya shkola», 2002. – 318s.
12. Ornatskiy P.P. Teoreticheskiye osnovy informatsionno–izmeritelnoy tekhniki / Ornatskiy P.P. – K.: Vishcha shkola, 1983. – 455s.
13. Polishko S.P. Tochnost sredstv izmereniy / S.P. Polishko, A.D. Turbenok. – K.: Vishcha shkola, 1988. – 149s.
14. Rudzit YA.A. Osnovy metrologii, tochnost i nadezhnost v priborostroyenii / YA.A. Rudzit, V.N. Plutalov. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 304s.
15. Surikova Ye.I. Pogreshnosti priborov i izmereniy / Surikova Ye.I. – L. Izd–vo Leningr. un–ta, 1975. – 160s.
16. Gavrilov L.N. Tochnost proizvodstva v mashinostroyenii i priborostroyenii / L.N. Gavrilov N.A. Borodachev, R.M. Abrashitov. – M.: Mashinostroyeniye, 1973. – 567s.
17. Bruyevich. N.G. Osnovy teorii tochnosti mekhanizmov: monografiya / N.G. Bruyevich, Ye.A. Pravotorova, V.I. Sergeyev. – M.: Nauka, 1988.
18. Fundamentalnyye problemy teorii tochnosti. Kollektiv avtorov / Pod red. V.P. Bulatova, I.G. Fridlendera. — SPb.: Nauka, 2001. — 504 s.
19. Dzheyms E.T. O logicheskom obosnovanii metodov maksimalnoy entropii/ E.T. Dzheyms // Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i elektronike, t. 70, №9, 1982, S. 33–51.
20. Kopp V.YA. Opredeleniye granichnoy otsenki chisla mnogokratnykh dvukhparametricheskikh izmereniy na osnove analiza differentsialnoy entropii / V.YA. Kopp, A.I. Balakin, O.V. Filippovich i dr. // Vestnik SevNTU № 83. – Sevastopol, 2007. – S.168–171.
21. Kopp V.YA. Informatsionnyy analiz diapazonov izmereniy / V.YA. Kopp, A.A. Skidan, V.M. Sharapov i dr. // Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov: Sb. nauch. tr. Vyp.10. – Sevastopol: Izd–vo SevNTU, 2007. – S. 196 – 199.
22. Kopp V.YA. Analiz differentsialnoy entropii pri tekhnicheskikh izmereniyakh v Mashino– priborostroyenii / V.YA. Kopp, A.A. Skidan, A.I. Balakin, O.V. Filipovich // "Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta" nauchnyy i proizvodstvenno–prakticheskiy sbornik po tekhnicheskim i yestestvennym naukam – vypusk 1(27) Odessa 2007. –S.214–218.
23. Kopp V.YA., Skidan A.A., Vasyutenko A.P. Optimalnaya otsenka chisla izmereniy pribornykh sistem // Vestnik SevNTU. Vyp. 36: Avtomatizatsiya protsessov i upravleniye: Sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2002. – S. 75 – 80.
24. Kopp V.YA. Ispolzovaniye printsipa maksimuma entropii pri otsenke trebuyemogo chisla izmereniy dlya pribornykh sistem / V.YA. Kopp, A.I. Balakin, Ye.A. Chuyko, M.V. Zamoronov // Tekhnologichnikompleksi: nauchnyy zhurnal. – Luts, 2013. – №2(28). – S.52 – 58.

Kopp Vadim Yakovlevich

FSAEI of HE «Sevastopol State University», Sevastopol
 Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the
 Department "Instrument Systems and Automation of
 Technological Processes" of Sevastopol State University
 299053, Sevastopol, st. University, 33
 Ph. 55–00–77
 E–mail: v_kopp@mail.ru

Balakin Alexey Igorevich

FSAEI of HE «Sevastopol State University», Sevastopol
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
 Associate Professor of the Department "Instrument
 Systems and Automation of Technological Processes" of
 the Sevastopol State University
 299053, Sevastopol, st. University, 33
 Ph. 55–00–77
 E–mail: AIBalakin@sevsu.ru

Л.И. КУШНАРЕВ, С.Л. КУШНАРЕВ

К КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В ТЕХНИКЕ ЧЕРЕЗ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА

Аннотация. Любое современное производство постоянно нуждается в сохранении и воспроизводстве своей материально–технической базы и, в первую очередь, ее активной части – машин и оборудования. При этом предприятия многих отраслей экономики, в последнее время, используя открывшиеся возможности активно приобретали зарубежную дорогостоящую технику, машины и оборудование. Несмотря на огромную потребность предприятий в технике, за исключением некоторых отраслей, значительной импортозависимости пока нет. Но результаты использования зарубежной техники указывают на возможность и необходимость повышения качественного уровня и надежности отечественных машин и оборудования. При этом повышение этого уровня возможно только при внедрении в государственных масштабах фирменного метода технического сервиса. Эффективность разработки и реализации такого проекта позволяет существенно снизить эксплуатационные издержки и себестоимость продукции, работ и услуг.

Ключевые слова: конкурентоспособность, технический уровень, надежность, качество, эффективность.

Введение

Современные потребности большинства сфер производства продукции, работ и услуг с высокой степенью механизации и автоматизации процессов постоянно нуждаются в обновлении своего технического потенциала, проведении технологической и технической модернизации производственных процессов и материально–технической базы предприятий и отраслей. За последние два с половиной десятилетия рыночных отношений и полной хозяйственной самостоятельности предприятий страны стало возможным приобретение для их нужд различной техники, машин и оборудования зарубежного производства. Особенно это наглядно в автомобильном транспорте, в сельскохозяйственном производстве, переработке сельскохозяйственной продукции и других отраслях и сферах народного хозяйства. Как правило, закупки зарубежной техники российскими потребителями осуществляются не отдельными машинами, а целыми машинно–технологическими комплексами для выполнения полного технологического цикла производства определенных видов продукции, работ или услуг. Именно это, наряду с высоким уровнем надежности и качества приобретаемых машин и оборудования, обеспечивает требуемое качество и своевременность технологических и производственных процессов, высокую эффективность результатов деятельности предприятий [1–4].

С точки зрения численного соотношения количество импортной техники, машин и оборудования на предприятиях агропромышленного комплекса составляет примерно 7–12 %. Так, за отмеченный период, по данным Федеральной таможенной службы, в Российскую Федерацию ввозится по 700–900 тракторов, зерно– и кормоуборочных комбайнов. Среднегодовое приобретение отечественной техники, машин и оборудования находится на уровне: по тракторам – 4–5 тыс. штук, комбайнов зерноуборочных 2–3 тыс. и кормоуборочных 750–900 штук. В результате, на начало 2015 г. парк импортных энергомашин на предприятиях агропромышленного комплекса составляет примерно по 15–18 тыс. машин каждого типа (тракторы, зерно– и кормоуборочные комбайны).

Безусловно, имеющаяся в агропредприятиях России импортная высокопроизводительная техника, используется хозяйствами на полную мощность и с максимальной загрузкой. И ее доля в общем объеме выполняемых при производстве сельскохозяйственной продукции механизированных процессов и работ, значительно выше, чем 7–12 %. При этом новая зарубежная техника используется в 2–3 раза интенсивнее, чем физически изношенный и морально устаревший парк машин и оборудования отечественного производства. Фактор повышения интенсивности и эффективности использования зарубежной техники существенно повышает уровень импортозависимости материального

производства от наличия и применения высокопроизводительной, качественной и надежной импортной техники, машин и оборудования [3–5].

Исследовательская часть

Главной *целью* настоящей научно–исследовательской работы является повышение и обеспечение качества и надежности машин и оборудования российского производства на уровне лучших мировых аналогов на всех этапах их жизненного цикла на основе внедрения фирменного технического сервиса. Исходя из того, что цены на импортные энергомашины выше цен на аналоги российского производства и стран СНГ более чем в 5–7 раз, то уместно отметить, что отечественные машиностроительные предприятия теряют в последние годы значительный объем заказов и выручки. При этом необходимо также учитывать, что зарубежные компании при продвижении на российский рынок и реализации своей техники применяют агрессивно настойчивую рекламу и пропаганду для достижения своих целей [4–6].

Суммарная потребность предприятий АПК страны в новой и современной технике, машинах и оборудовании зависит, прежде всего, от объемов производства продукции работ и услуг, необходимых для полного удовлетворения потребностей населения страны в продуктах питания требуемого качества и с минимальными производственными издержками. При определении реальной потребности в них, например, для растениеводства необходимо учитывать структуру сельскохозяйственных угодий и урожайность культур, рекультивацию земель, выбывших из севооборота, применяемые технологии и технические средства механизации производственных процессов, их возраст, производительность и другие технико–экономические показатели, а также реальные производственно–экономические условия, формы и методы организации использования техники, машин и оборудования. В настоящее время, по данным научно–исследовательских учреждений, потребность агропредприятий в тракторах составляет около 850–900 тыс. штук, комбайнах зерноуборочных – 350–450 тыс. и кормоуборочных – 250–300 тыс. штук [7, 8]. И это без учета того, что примерно около 80 % техники эксплуатируются за пределами нормативных сроков эксплуатации и имеют значительный физический и моральный износ.

Несмотря на огромную потребность в технике, машинах и оборудовании, реальный спрос составляет примерно в 75–100 раз меньше. Объясняется это, прежде всего тем, что основные потребители сельскохозяйственной техники, машин и оборудования – сельские товаропроизводители – имеют низкий уровень доходности от своей основной деятельности и не в состоянии вести расширенное воспроизводство сельхозпродукции и приобретать необходимую технику. А использование физически и морально устаревшей техники, машин и оборудования ведет к росту в 2,5–3 раза производственных затрат, простоев по техническим причинам и потерь сельскохозяйственной продукции, зачастую, уже выращенной, но неубранной [7–9].

Таким образом, можно сделать вывод, что несмотря на огромную потребность агропредприятий в технике, машинах и оборудовании на российском рынке техники сохраняется низкий уровень реального спроса на них. При этом примерно около половины выручки за реализованную агропредприятиям технику, машины и оборудование получают иностранные поставщики, что снижает объемы производства отечественных машин почти в 2 раза.

Вместе с тем, использование зарубежных машин и оборудования, машинно–технологических комплексов на предприятиях страны позволило освоить новые, современные и ресурсосберегающие технологии производства многих видов сельхозпродукции. Для массового распространения этих технологий в агропроизводстве страны в настоящее время созданы отечественные аналоги машин и машинно–технологических комплексов. В результате в сельскохозяйственном производстве наметился переход к созданию и использованию машин и машинно–технологических комплексов, обеспечивающих выполнение 7–10 технологических операций за один проход рабочего агрегата, снижая при этом разрушающее воздействие машин на почву и расход топлива на выполнение комплекса механизированных операций. Во многом, благодаря появлению на

российском рынке зарубежной техники, за последние годы отечественные машиностроители создали множество машин и машинно–технологических комплексов, которые по техническим характеристикам, обеспечению технологических требований и качеству технологических процессов не только не уступают зарубежным аналогам, но и превосходят их. Это стало возможным только потому, что они создавались для реальных производственно–экономических условий агропредприятий России.

Вместе с тем, существенно снижает уровень конкурентоспособности отечественной техники, машин и оборудования – это низкий уровень качества и надежности выпускаемой техники, огромные потребности машин и оборудования в техническом сервисе и, прежде всего, в выполнении неплановых текущих ремонтов по устранению последствий отказов различных групп сложности. Это, в свою очередь, требует наличия оснащенной современным технологическим оборудованием ремонтно–обслуживающей базы на агропредприятиях и высококвалифицированного персонала по техническому сервису машин и оборудования. В конечном итоге, обеспечение работоспособности машин и оборудования предприятий существенно повышает издержки производства и снижает эффективность их деятельности [8–10].

Сложившийся низкий уровень качества и надежности отечественной техники – это результат монополизма и отсутствие рыночной конкуренции в сфере машиностроения между предприятиями, выпускающими технику, машины и оборудование.

Основными показателями надежности, наиболее сильно негативно влияющими на эффективность использования машин и оборудования, являются наработка на отказ и трудоемкость устранения последствий отказа. Сравнительная оценка надежности отечественной и зарубежной техники по наработке на отказ указывает на беспрецедентно низкий уровень надежности и качества российских машин и оборудования, что значительно снижает их уровень конкурентоспособности как на российском, так и международном рынке.

Результаты исследований

Установлено, что на сегодняшний день решение проблемы повышения качества, надежности и эффективности отечественной техники, машин и оборудования существует. И находится это решение в организационно–технологической и организационно–экономической плоскостях. Разработан, смоделирован и требует практической проверки и реализации организационно–экономический механизм повышения качества и надежности, выпускаемой предприятиями машиностроения продукции. Реализовать этот проект представляется возможным только с участием всех структурных элементов (звеньев) машиноиспользования и заводов–изготовителей, представляющих собой саморегулируемую систему, нацеленную, в первую очередь, на повышение качества и надежности выпускаемой машиностроительной продукции.

В основе реализации данного проекта комплексность и системность подходов к обоснованию потребности в технике, машинах и оборудовании, разработке механизма интенсификации их использования в реальных производственных условиях многоукладной экономики, к обеспечению требуемого уровня работоспособности машин и оборудования, постоянного повышения их качества, надежности и эффективности при снижении производственных издержек во всех сферах машиноиспользования и реального материального производства продукции, работ и услуг.

При этом необходимо отметить, что при реализации проекта значительные экономические выгоды получают не только предприятия машиностроения, но и потребители техники, машин и оборудования, предприятия воссозданной сферы технического сервиса. Организация их деятельности на принципах функционально–технологической интеграции и разработанных рыночных механизмов взаимоотношений в рамках саморегулируемой экономической системы должна быть нацелена на обеспечение приоритета прав потребителя техники – повышение качества и надежности продукции машиностроительных предприятий и корпораций.

Наряду с решением проблем импортозависимости и импортозамещения попутно автоматически решаются проблемы конкурентоспособности производимой машиностроительными предприятиями продукции, повышения ее технического уровня, качества, надежности и эффективности. Синергетическую экономическую эффективность данного проекта на данном этапе определить весьма сложно, но экспертные оценки специалистов однозначно указывают на снижение себестоимости, например, сельскохозяйственной продукции более чем на треть, что обеспечивает высочайшую эффективность и окупаемость инвестиций, необходимых для реализации проекта. Тем более, что несмотря на высокую наукоемкость решаемых организационно-технологических и организационно-экономических задач потребности в инвестициях минимальны. И значительную часть финансирования этих инвестиций при формировании определенных требований государства к качеству, надежности и эффективности машиностроительной продукции на себя могут взять предприятия бизнеса, которые заинтересованы в повышении конкурентоспособности своей продукции [7–9].

Выводы и предложения

Таким образом, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения позволяет:

снизить потребность всех производственных отраслей экономики страны в основных средствах производства и капиталовложениях на их создание и приобретение;

снизить потребность в материально-технической базе обеспечивающей работоспособность и эффективное использование по назначению техники, машин и оборудования;

ускорить технологическую модернизацию машиностроительного производства, производственных процессов во всех отраслях экономики страны;

повысить эффективность использования всех видов производственных ресурсов, применяемых при эксплуатации техники, машин и оборудования;

снизить затраты на обеспечение работоспособности основных средств производства в 2,5–3 раза, которые сегодня во всех отраслях экономики составляют более 5,0 трлн. р.;

повысить работоспособность технических средств, обеспечить своевременность и качество технологических процессов производства продукции, работ и услуг, что позволит дополнительно, практически без дополнительных затрат, получить на 15–20 % высококачественной продукции больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве. Ч. 1. – М.: ГОСНИТИ, 1985. – 143 с.
2. Техническая эксплуатация сельскохозяйственных машин (с нормативными материалами). – М.: ГОСНИТИ, 1993.
3. Кушнарв Л.И., Чепурина Е.Л., Кушнарв С.Л., Чепурин А.В. Модернизация системы технического сервиса аграрно-промышленного комплекса: монография, под общей ред. Л.И. Кушнарева. М.: Издательство журнала «МЭСХ». – 2015. – 450 С.
4. Кушнарв Л. Фирменный технический сервис машин и оборудования. Проблемы. Поиски. Решения. Palmarium academic publishing. – 2014. – 210 с.
5. Кушнарв Л.И. К решению комплексной проблемы повышения надежности машин и оборудования //Ремонт, восстановление, модернизация. – №10. – 2016. – С. 43–49.
6. Кушнарв Л.И. Алешин В.Ф. К повышению эффективности государственной поддержки предприятий машиностроения // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. Сетевое издание. – № 03, июнь 2016. – С. 1–8.
7. Кушнарв Л.И. Повышение конкурентоспособности российской техники//Сельский механизатор. – 2016. – № 9. – С. 4–7.
8. Кушнарв Л.И. Реновация машин и оборудования на основе фирменного технического сервиса//Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 288. В 4-х ч. IV. М.: Изд-во РГАУ–МСХА. – 2016. – С. 289–294.
9. Кушнарв Л.И. К решению комплексной проблемы повышения надежности машин и оборудования//Труды ГОСНИТИ, том 125. М.: ГОСНИТИ. –2016. – С.74–80.

10. Кушнарев Л.И. Алешин В.Ф. Чепурин А.В. Внедрение фирменного технологического сервиса для повышения качества техники. //Иновационная наука. – 2016. – № 12–2. – С. 80–83.

Кушнарев Леонид Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология обработки материалов» Московского
государственного технического университета имени
Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (916) 055–31–41
E-mail: kushnarevl@mail.ru

Кушнарев Сергей Леонидович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали
машин» Московского государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (916) 055–31–41
E-mail: serg-leo@mail.ru

L.I. KUSHNAREV, S.L. KUSHNAREV

TO COMPETITIVENESS IN TECHNOLOGY THROUGH IMPROVING THE QUALITY

Abstract. *Any modern production constantly needs preservation and reproduction of the material and technical base and, first of all, its active part—cars and the equipment. However, companies in many industries, in recent years, using this opportunity, actively acquired foreign costly equipment, machinery and equipment. Despite the huge demand of enterprises for technology, with the exception of some industries, there is still no significant dependence on imports. But the results of the use of foreign technology indicate the possibility and need to improve the quality and reliability of domestic machinery and equipment. Thus increase of this level is possible only at introduction in the state scales of a firm method of technical service. The effectiveness of the development and implementation of such a project can significantly reduce operating costs and the cost of products, works and services.*

Keywords: *competitiveness, technical level, reliability, quality, efficiency.*

BIBLIOGRAPHY

1. Complex system of maintenance and repair of machines in agriculture. Part 1. – Moscow: GOSNITI, 1985. – 143 p.
2. Technical operation of agricultural machines (with standard materials). – Moscow: GOSNITI, 1993.
3. Kushnarev L. I., Chepurina E. L., Kushnarev S. L., Chepurin A. V. Modernization of the system of technical service of the agrarian–industrial complex: monograph, edited By L. I. Kushnarev. Moscow: Publishing house of the magazine "MESKH". – 2015. – 450 P.
4. Kushnarev L. Firm technical service of machines and equipment. Problems. Search. Decisions. Palmarium academic publishing. – 2014. – 210 p.
5. Kushnarev L. I. to the solution of complex problem of increase of reliability of machines and equipment // / Repair, restoration, modernization. – No. 10. – 2016. – P. 43–49.
6. Kushnarev L. I. Aleshin V. F. to increase the efficiency of state support of machine–building enterprises//Machines and installations: design, development and operation. MGTU im. H. Uh... Bauman, Moscow, Russia. Online edition. No. 03, June 2016. – P. 1–8.
7. Kushnarev L. I. improving the competitiveness of Russian technology//Rural mechanic. – 2016. No. 9. – P. 4–7.
8. Kushnarev L. I. Renovation of machinery and equipment based on proprietary technical tools//reports of the TAA: a Collection of articles. Vol. 288. In a 4-h IV. M.: publishing house of Russian state agrarian University–Moscow agricultural Academy. – 2016. – C. 289–294.
9. Kushnarev L. I. To the solution of complex problems of improving the reliability of machinery and equipment//Proceedings of GOSNITI, volume 125. M.: GOSNITI. –2016. – P. 74–80.
10. Kushnarev L. I. Aleshin, V. F., A. V. Chepurin the Introduction of corporate technological service to improve the quality of equipment. // Innovative science. – 2016. – № 12–2. – P. 80–83.

Kushnarev Leonid Ivanovich

Bauman Moscow State Technical University
Doctor of Tech. Science, Professor of Department
«Technology of material working»
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267–17–71
E-mail: kushnarevl@mail.ru

Kushnarev Sergey Leonidovich

Bauman Moscow State Technical University
candidate of technical Sciences, associate Professor
Department of RK–3 "Basic design of machines"
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267–17–71
E-mail: serg-leo@mail.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ГИДРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Аннотация. Исследование гидроупругих колебаний конструкций в потоке жидкости в настоящее время является весьма актуальной задачей. Численное моделирование таких процессов позволяет улучшить качество проектирования выдвижных устройств объектов морской техники за счет определения их напряженно-деформированного состояния для различных режимов эксплуатации. В работе проведена верификация численных методов, используемых при решении гидроупругой задачи в сопряженной постановке. Результаты расчета обтекания цилиндрического стержня большого удлинения сопоставлялись с экспериментальными данными. Напряженно-деформированное состояние заделанного стержня, совершающего колебания под действием внешней нестационарной гидродинамической нагрузки, было определено с помощью метода конечных элементов и разработанного аналитического метода с последующим сравнением результатов. Для обоснования возможности расчета течений в областях с изменяемой геометрией результаты численного расчета колебаний крыла в потоке жидкости сопоставлялись с экспериментальными данными и аналитическими оценками.

Ключевые слова: гидроупругость, колебания, выдвижное устройство, гидродинамические характеристики.

Введение

На сегодняшний день выдвижные устройства, выполняемые в виде телескопических консольных конструкций, являются важной составной частью объектов морской техники и выполняют функцию обеспечения нормальной работы систем связи, наблюдения, навигации. В процессе эксплуатации такие конструкции испытывают колебания, возбуждаемые внешними гидродинамическими силами, которые имеют периодический характер вследствие отрыва вихрей по типу дорожки Кармана. Расчет вибропрочностных характеристик выдвижных устройств в процессе проектирования является важной и актуальной задачей, поскольку чрезмерно высокий уровень вибраций может привести к ряду негативных последствий, в числе которых можно отметить снижение скрытности, возникновение помех для работы собственных систем плавучего объекта, а также уменьшение срока эксплуатации самой конструкции.

Характер взаимодействия потока жидкости и конструкции является гидроупругим: воздействие нестационарных гидродинамических сил на конструкцию приводит к возникновению ее деформаций, в то же время, деформируясь, конструкция влияет на структуру потока, что влечет за собой изменение значений действующих гидродинамических сил. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет проводить численное моделирование гидроупругих процессов [1], учитывая наличие взаимосвязи между гидродинамическими силами и деформациями конструкции.

С точки зрения численного моделирования гидроупругую задачу можно представить в виде системы, состоящей из гидродинамической и динамической частей, между которыми организован обмен данными. В процессе решения гидродинамической части производится расчет характеристик потока и гидродинамических сил, действующих на конструкцию. В результате расчета динамической части определяется напряженно-деформированное состояние конструкции. В процессе решения задачи гидродинамический и динамический решатели обмениваются данными о действующих силах и результирующих перемещениях конструкции.

В данной работе была проведена верификация численного решения гидроупругой задачи о колебаниях упругого цилиндра в потоке жидкости. Результаты верификации позволяют осуществить переход к сопряженной постановке, а также рассматривать колебания устройств более сложной конфигурации.

Постановка задачи

В общем случае консольную конструкцию можно представить как стержень переменного сечения, один конец которого заделан, а другой свободен. Для уменьшения количества вычислений на этапе верификации имеет смысл перейти к простейшему виду консоли – однородному стержню постоянного круглого сечения.

Рассматриваемый стержень, взаимодействуя с потоком жидкости (скорость $v = 0.75$ м/с), совершает продольные и поперечные колебания. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

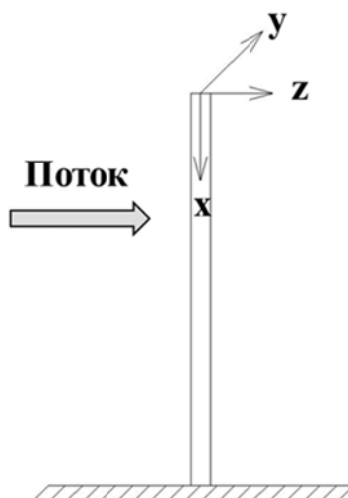


Рисунок 1 – Расчетная схема

Характеристики цилиндрического стержня представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики цилиндрического стержня

Характеристика	Значение
Диаметр D , м	0,116
Длина L , м	2,32
Удлинение L/D	20
Плотность материала ρ , кг/м ³	7850
Модуль Юнга материала E , Па	$2 \cdot 10^{11}$
Момент инерции сечения $J_y = J_z$, м ⁴	$8,88 \cdot 10^{-6}$
Момент сопротивления $W_y = W_z$, м ³	$1,53 \cdot 10^{-4}$
Статический момент сечения $S_y = S_z$, м ³	$1,3 \cdot 10^{-4}$

В процессе решения гидроупругой задачи используется ряд методов, нуждающихся в верификации. К таким методам можно отнести численные решения гидродинамической и динамической частей задачи. Кроме того, расчет гидродинамических сил производится в условиях изменяющейся (деформирующейся) геометрии рассматриваемого объекта. Соответственно, верификация гидроупругой задачи включает в себя следующие этапы:

1. верификация гидродинамической части задачи;
2. верификация динамической части задачи;
3. верификация численного расчета течений в областях с изменяемой геометрией.

Верификация гидродинамической части задачи. Расчет гидродинамических характеристик заделанного стержня

Турбулентное течение вязкой несжимаемой жидкости можно описать при помощи системы дифференциальных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), с дополнением той или иной модели турбулентности для замыкания системы. Выбор модели турбулентности должен быть основан на ее способности разрешать нестационарные явления, такие как периодический срыв вихрей с поверхности цилиндра. Одним из перспективных подходов к моделированию турбулентности сегодня является метод адаптируемых масштабов (SAS) [2]. RANS–подход с использованием SAS позволяет разрешать достаточно широкий диапазон частот вихревых структур, срывающихся с поверхности цилиндра.

Вначале проводилось сопоставление расчетных и экспериментальных данных для цилиндра большого удлинения. Экспериментальные зависимости стационарных и нестационарных коэффициентов гидродинамических сил, действующих на цилиндрический стержень, от числа Рейнольдса представлены в [3] и показаны на рисунках 2 и 3.

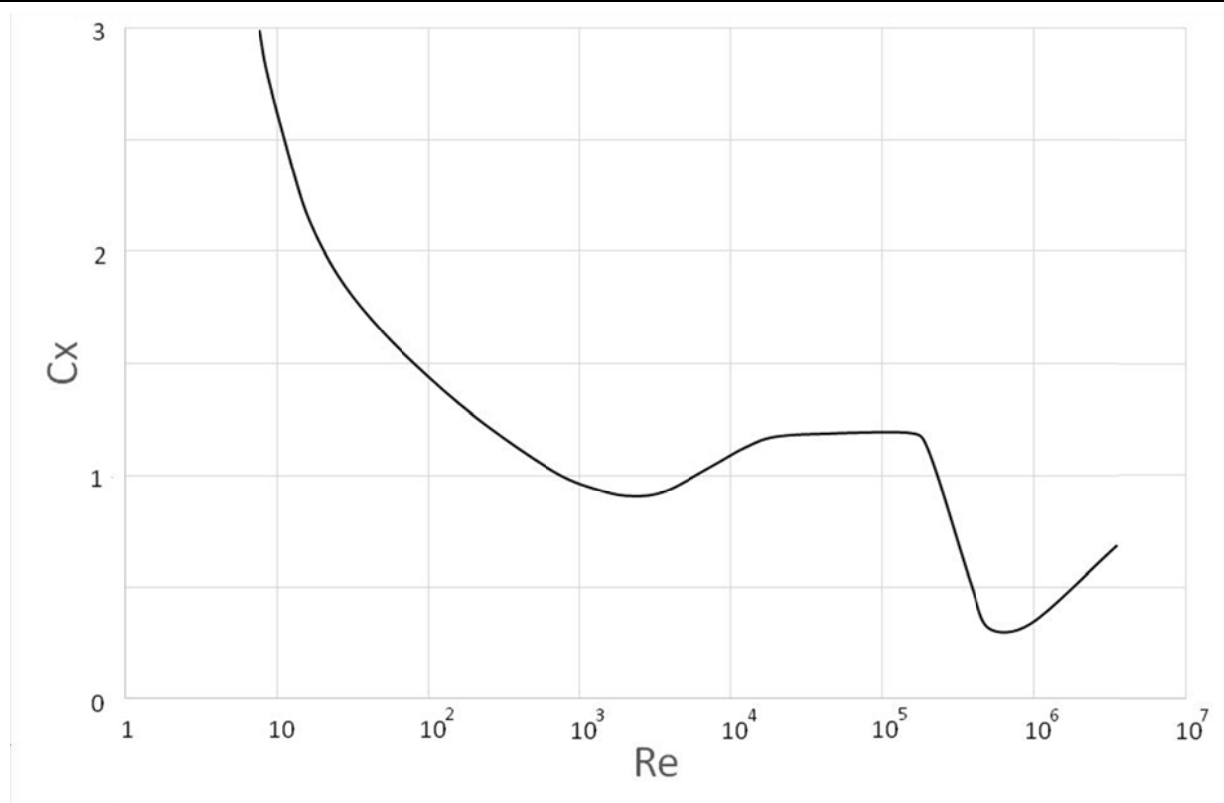


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента стационарной силы лобового сопротивления от числа Рейнольдса [3]

Для верификации численного метода был выбран режим, соответствующий $Re \approx 5.5 \cdot 10^6$ (скорость набегающего потока $v = 4.5$ м/с).

Расчетная область представляла собой параллелепипед с цилиндрическим вырезом в месте расположения стержня. Для данной области была построена расчетная сетка, состоящая из $19 \cdot 10^6$ гексаэдральных ячеек. В областях ожидаемых больших градиентов гидродинамических параметров осуществлялось сгущение сетки для лучшего разрешения структуры турбулентного пограничного слоя.

Расчетная сетка была импортирована в программный комплекс AnsysFluent. На входной по отношению к потоку границе задавалась скорость потока (4.5 м/с) и параметры турбулентности: интенсивность турбулентности (0.5 %) и характерный масштаб (0.116 м). На выходной границе задавалось давление в дальнем поле. На поверхности стержня ставились условия непротекания и прилипания, на всех остальных границах – симметрии.

В результате были рассчитаны поля параметров потока, а также гидродинамические силы, действующие на поверхность стержня. Поле скорости, а также изоповерхности завихренности показаны на рисунках 4 и 5. Следует отметить, что структура потока неоднородна по длине стержня и является принципиально трехмерной.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов стационарных и нестационарных гидродинамических сил, действующих на поверхность цилиндрического стержня, представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Параметр	Значение (эксперимент)	Значение (расчет)
Коэффициент стационарной силы лобового сопротивления C_{xst}	0,65	0,66
Коэффициент нестационарной боковой силы C_{yvibr}	0,30	0,43

Анализ завихренности показывает, что используемая математическая модель позволяет разрешать вихри на основной частоте, в то время как более мелкие вихри осредняются и сглаживаются. Этим и объясняется расхождение между экспериментальными

и расчетными значениями коэффициентов нестационарных гидродинамических сил. При этом результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в части значений коэффициентов стационарных сил. Возможно, использование модели, позволяющей разрешать более широкий спектр вихрей, позволит добиться более точных результатов, однако в связи с большой вычислительной трудоемкостью применение таких моделей представляется целесообразным после отработки методологии решения гидроупругой задачи в сопряженной постановке.

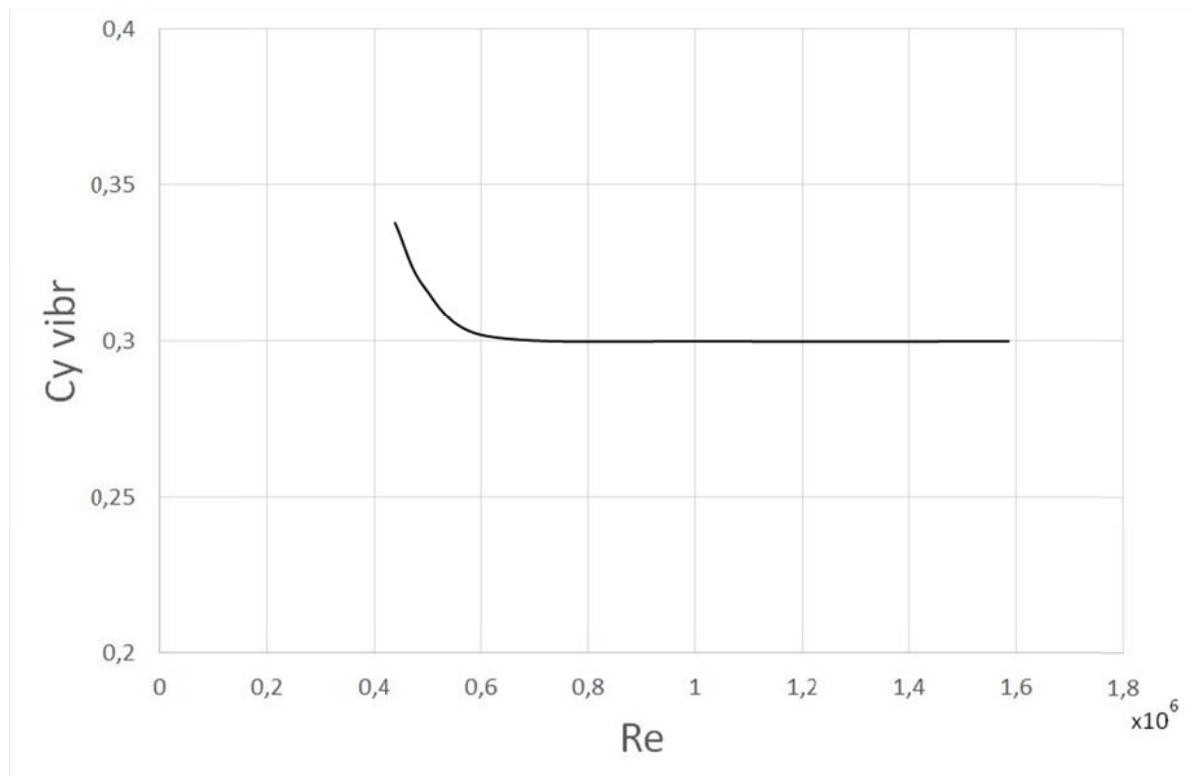


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента нестационарной боковой силы от числа Рейнольдса [3]

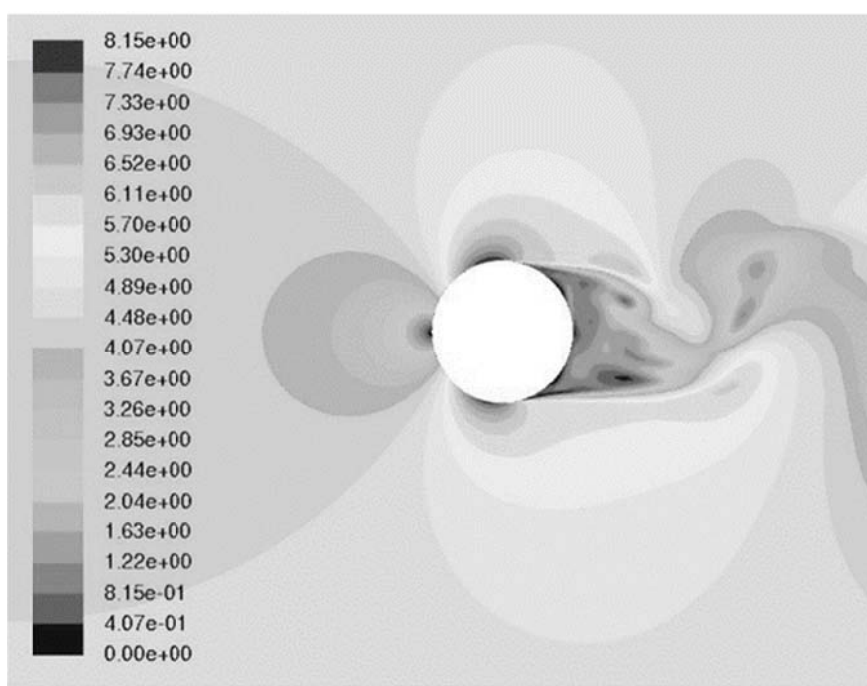


Рисунок 4 – Поле скорости (м/с) в среднем сечении цилиндрического стержня

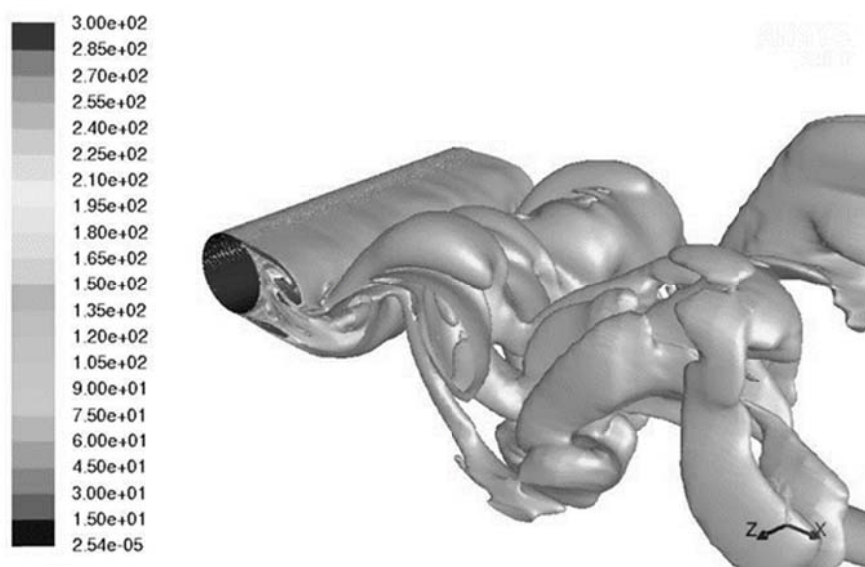


Рисунок 5 – Изоповерхности завихренности (1/с)

После проведения верификационного расчета гидродинамических характеристик стержня большого удлинения, данный метод был использован для определения нестационарных гидродинамических сил, действующих на заделанный цилиндрический стержень. Схема расчетной области, на которой показаны граничные условия, представлена на рисунке 6.

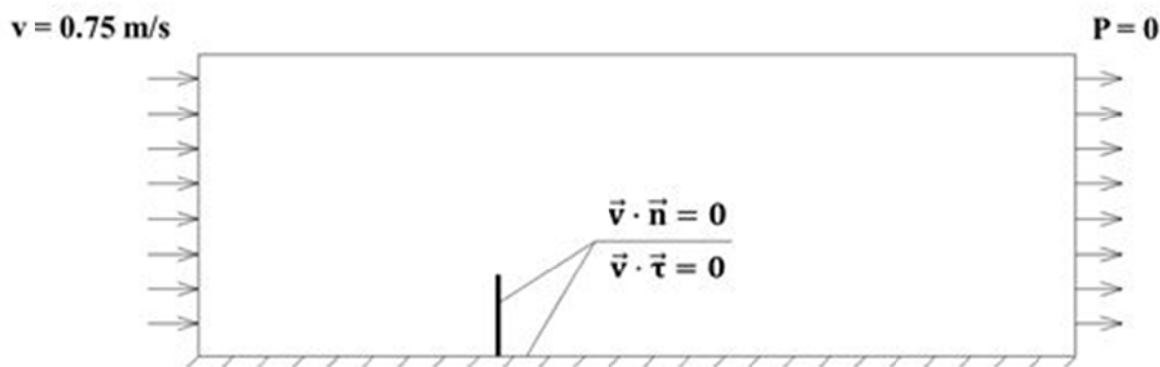


Рисунок 6 – Схема расчетной области и граничные условия

Для данной области была построена расчетная сетка, состоящая из $30 \cdot 10^6$ гексаэдральных ячеек. На входной по отношению к потоку границе задавалась скорость потока (0.75 м/с) и параметры турбулентности: интенсивность турбулентности (0.5 %) и характерный масштаб (0.116 м). На выходной границе задавалось давление в дальнем поле. На поверхности цилиндра и на нижней границе расчетной области (заделка) ставились условия непротекания и прилипания, на всех остальных границах задавалось условие симметрии.

Значения коэффициентов стационарных и нестационарных сил, действующих на цилиндр, а также число Струхала представлены в таблице 3. Эти значения будут использованы в дальнейшем для расчета колебаний цилиндрического стержня. Расхождения в значениях коэффициентов для стержня большого удлинения и заделанного стержня обусловлено влиянием пограничного слоя, образующегося на поверхности заделки.

Верификация динамической части. Аналитический и численный метод расчета колебаний цилиндрического стержня

Верификация динамической части гидроупругой задачи основана на сопоставлении расчетных результатов, полученных при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в пакете AnsysMechanical, с аналитическими оценками [4, 5].

Таблица 3 – Результаты гидродинамического расчета

Параметр	Значение
Коэффициент стационарной силы лобового сопротивления C_{xst}	0,87
Коэффициент нестационарной силы лобового сопротивления C_{xvibr}	0,04
Коэффициент нестационарной боковой силы C_{yvibr}	0,2
Число Струхала	0,2

Рассмотрим изгибные колебания стержня, которые можно описать дифференциальным уравнением:

$$EJ \left(1 + h \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right] + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = q(x, t), \quad (1)$$

где EJ – изгибная жесткость;

h – коэффициент внутреннего трения;

m – масса единицы длины стержня (с учетом присоединенных масс);

$q(x, t)$ – внешняя распределенная нагрузка.

При отсутствии внешней распределенной нагрузки решение (1) будем искать в виде ряда:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) q_n(t), \quad (2)$$

где $f_n(x)$ и $q_n(t)$ – частные решения уравнения (1).

Подставив (2) в (1) и разделив переменные, получим:

$$\frac{EJ \cdot f_n^{IV}}{m \cdot f_n} = - \frac{\ddot{q}_n}{q_n + h \dot{q}_n} = \omega_n^2, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

или

$$EJ \cdot f_n^{IV} - \omega_n^2 \cdot f_n \cdot m = 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где

$$2\xi_n = h \cdot \omega_n. \quad (6)$$

Граничные условия на свободном ($x=0$) и заделанном ($x=L$) концах стержня имеют вид

$$f_n''(0) = 0, \quad f_n'''(0) = 0, \quad (7)$$

$$f_n(L) = 0, \quad f_n'(L) = 0. \quad (8)$$

Уравнение (4) можно свести к системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, для этого сделаем замену:

$$u_1 = f(x), \quad u_2 = f'(x), \quad u_3 = EJ \cdot f''(x), \quad u_4 = EJ \cdot f'''(x). \quad (9)$$

С учетом замены (9) уравнение (4) сводится к системе:

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = A(\omega)\bar{u}, \quad (10)$$

где

$$\bar{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}, \quad A(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EJ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega^2 \cdot m & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Общее решение системы (10) имеет вид:

$$\bar{u} = C_1 \bar{u}_1 + C_2 \bar{u}_2 + C_3 \bar{u}_3 + C_4 \bar{u}_4, \quad (12)$$

или

$$u_k = C_1 u_{k1} + C_2 u_{k2} + C_3 u_{k3} + C_4 u_{k4}. \quad (13)$$

Используя граничные условия на свободном конце, получаем значения констант $C_3 = 0$ и $C_4 = 0$; общее решение имеет вид:

$$\bar{u} = C_1 \bar{u}_1 + C_2 \bar{u}_2. \quad (14)$$

Используя граничные условия на конце с заделкой, получаем:

$$\begin{cases} C_1 u_{11}(L) + C_2 u_{12}(L) = 0 \\ C_1 u_{21}(L) + C_2 u_{22}(L) = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

Нетривиальное решение (15) получим, если

$$D(\omega) = \begin{vmatrix} u_{11}(L) & u_{12}(L) \\ u_{21}(L) & u_{22}(L) \end{vmatrix} = 0. \quad (16)$$

Задавая различные значения ω и повторяя процесс решения, можно определить функцию $D(\omega)$. Корни этой функции будут являться собственными частотами ω_n . Для каждой собственной частоты определяем константы интегрирования, а также формы собственных колебаний:

$$f_n(x) = \left[u_{11}(x) - \frac{u_{11}(\omega_n, L)}{u_{12}(\omega_n, L)} u_{12}(x) \right]. \quad (17)$$

Гидродинамические силы, действующие на цилиндр, можно представить в виде суммы стационарных и нестационарных составляющих. При воздействии стационарной силы упругая конфигурация стержня определяется уравнением:

$$EJ \frac{d^4 z}{dx^4} = q_{st}, \quad (18)$$

где EJ – изгибная жесткость в соответствующем направлении;

q_{st} – погонная (действующая на 1 м стержня) стационарная гидродинамическая сила, которая определяется как

$$q_{st} = c \frac{\rho v^2}{2} d, \quad (19)$$

где c – коэффициент гидродинамического сопротивления сечения;

v – скорость потока;

d – характерный размер сечения (диаметр).

Система дифференциальных уравнений, эквивалентная (18), может быть записана в виде:

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = A\bar{u} + B, \quad (20)$$

где

$$\bar{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EJ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_{st} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Решение представимо в виде

$$\bar{u} = C_1 \bar{u}_1 + C_2 \bar{u}_2 + C_3 \bar{u}_3 + C_4 \bar{u}_4 + \bar{u}_0, \quad (22)$$

где

$$\bar{u}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

С учетом граничных условий:

$$\begin{cases} C_1 u_{11}(L) + C_2 u_{12}(L) + u_{10}(L) = 0 \\ C_1 u_{21}(L) + C_2 u_{22}(L) + u_{20}(L) = 0 \end{cases}. \quad (24)$$

Определив C_1 и C_2 , получаем упругую конфигурацию стержня при воздействии стационарной нагрузки.

Нестационарную нагрузку $q(x, t)$ представим в виде произведения $q(t)P(x)$. Тогда вынужденные колебания стержня описываются уравнением

$$EJ(q_n + h\dot{q}_n) \left[\sum_{n=1}^{\infty} f_n^{IV} \right] + m \sum_{n=1}^{\infty} f_n \ddot{q}_n = q(t)P(x). \quad (25)$$

Умножая (25) на f_n и интегрируя от 0 до L, получаем

$$m_n(\ddot{q}_n + 2\varepsilon_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n) = Q_n, \quad (26)$$

где

$$m_n = m \int_0^L f_n^2 dx, \quad (27)$$

$$2\varepsilon_n = h \frac{k_n}{m_n}, \quad (28)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k_n}{m_n}, \quad (29)$$

$$k_n = EJ \int_0^L f_n^{IV} f_n dx, \quad (30)$$

$$Q_n = q(t) \int_0^L P(x) f_n dx. \quad (31)$$

Представим внешнюю распределенную гидродинамическую нагрузку в виде

$$q(x, t) = q(t)P(x) = P_{gd}(x) \cos(\omega t). \quad (32)$$

Тогда обобщенные силы равны

$$Q_n = \cos(\omega t) \int_0^L P_{gd}(x) f_n dx = Q'_n \cos(\omega t). \quad (33)$$

Подставляя (33) в (26), получим

$$\ddot{q}_n + 2\varepsilon_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{Q'_n}{m_n} \cos(\omega t). \quad (34)$$

Решение (34) можно представить в виде

$$q_n = A_n \cos(\omega t - \varphi_n), \quad (35)$$

где

$$A_n = \frac{Q'_n}{m_n \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon_n^2 \omega^2}}, \quad (36)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{2\varepsilon_n \omega}{\omega_n^2 - \omega^2}. \quad (37)$$

Таким образом, вынужденные колебания стержня можно записать в виде

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n A_n \cos(\omega t - \varphi_n). \quad (38)$$

Анализ коэффициентов A_n в выражении (36) показывает, что при совпадении частоты срыва вихрей с частотой собственных колебаний цилиндра возможно возникновение резонансных явлений. Описанный алгоритм легко может быть распространен на случай колебаний стержня переменного сечения.

Программа в общем случае позволяет производить расчет колебаний стержня переменного сечения, состоящего из шести участков с различными гидродинамическими и жесткостными характеристиками. В случае однородного цилиндрического стержня он разбивается на шесть участков, суммарная длина которых составляет его длину. Окно графического интерфейса программы представлено на рисунке 7.

pmuVibroVer2

Расчет собственной частоты

Введите собственную частоту ω (рад/с)

Поперечные колебания: 18.43
 Продольные колебания: 35.8

Наделка

m (кг)	am (кг)	d (м)	h (м)
71.2	91.9	0.3	1.3
Cx st.	Cy st.	Cx vibr.	Cy vibr.
0.95	0	0.25	0.3

Расчет поперечных колебаний

Расчет продольных колебаний

E (Па)	v (м/с)
2.1e11	5.15

	L (м)	m (х) (кг/м)	amx (кг/м)	amy (кг/м)	Jx (м ⁴)	Jy (м ⁴)	wx (м ³)	wy (м ³)	sx (м ³)	sy (м ³)	dx (м)	dy (м)
1	1.9	76.8	22.7	76	0.158e-04	0.517e-04	0.335e-03	0.206e-03	0.262e-03	0.147e-03	0.3	0.17
2	0.48	403	109	255	0.331e-03	0.868e-03	0.293e-02	0.177e-02	0.212e-02	0.135e-02	0.57	0.37
3	1.08	463	109	255	0.331e-03	0.868e-03	0.293e-02	0.177e-02	0.212e-02	0.135e-02	0.57	0.37
4	1.74	420	109	255	0.307e-03	0.749e-03	0.234e-02	0.164e-02	0.169e-02	0.116e-02	0.57	0.37
5	1.48	746	448	503	0.117e-02	0.346e-02	0.806e-02	0.389e-02	0.588e-02	0.316e-02	0.57	0.57
6	3.72	543	448	503	0.755e-03	0.239e-02	0.594e-02	0.248e-02	0.360e-02	0.168e-02	0.57	0.57

	Cx st.	Cy st.	Cx vibr.	Cy vibr.	Cy beta
1	0.58	0	0.25	0.22	2.41
2	0.58	0	0.25	0.22	2.41
3	0.58	0	0.25	0.22	2.41
4	0.58	0	0.25	0.22	2.41
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0

Звено, вызывающее вибрации

	Sh	d (м)
Поперечные колебания	0.21	0.37
Продольные колебания	0.35	0.37

Скорости потока на границах зон резонанса (м/с)

V1 = V2 =

Рисунок 7 – Программа для расчета вибропрочностных характеристик стержня переменного сечения

С учетом данных из таблиц 1 и 3 были рассчитаны вибропрочностные характеристики стержня при поперечных и продольных колебаниях. Распределения максимальных значений перемещений и нормальных напряжений по длине стержня при продольных колебаниях показаны на рисунках 8 и 9.

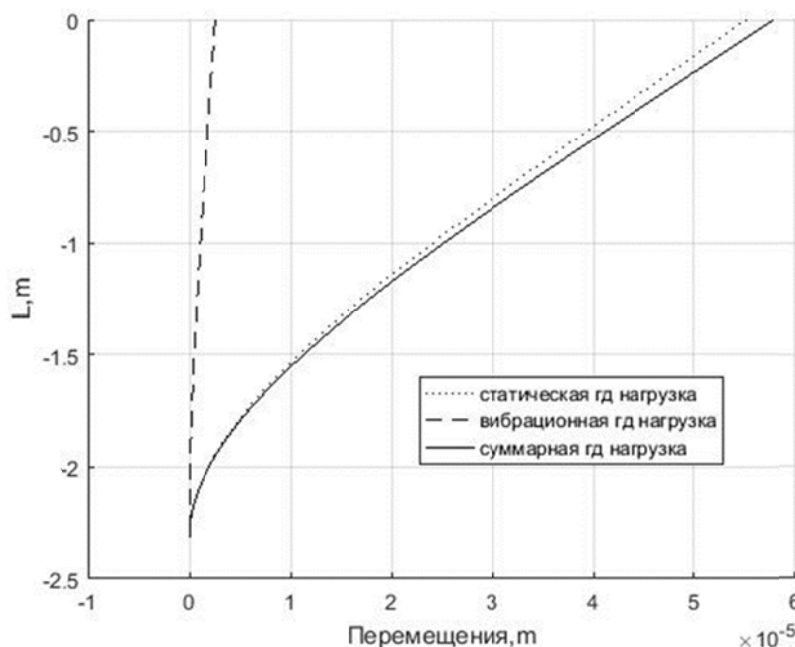


Рисунок 8 – Перемещения (продольные колебания)

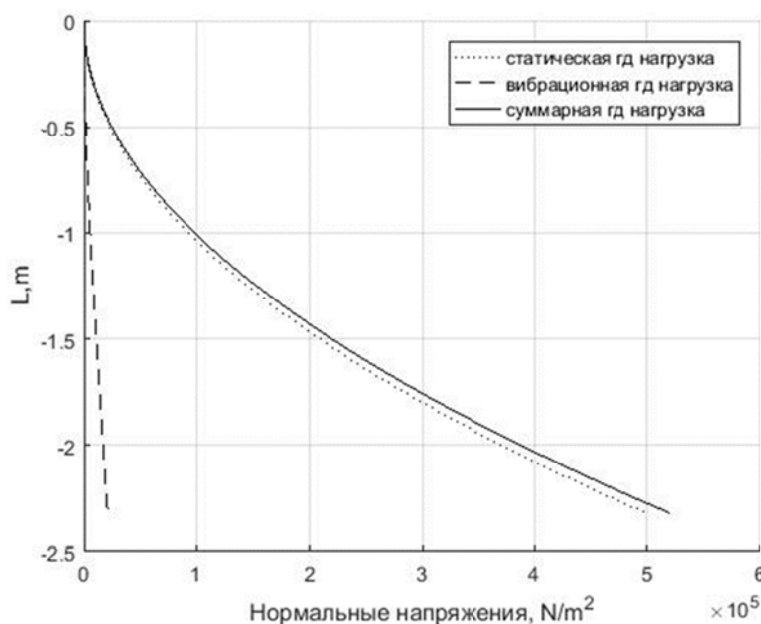


Рисунок 9 – Нормальные напряжения (продольные колебания)

Описанный аналитический метод был реализован в пользовательской программе на

Аналогичные расчеты были проведены в программном комплексе AnsysMechanical при помощи метода конечных элементов (МКЭ). К трехмерной модели стержня, разбитой на конечные элементы (рисунок 10), в модуле TransientStructural были поочередно приложены сила лобового сопротивления, которая имела вид

$$F_x = Ld \frac{\rho v^2}{2} (c_{xst} + c_{xvibr} \sin(\omega t)), \quad (39)$$

и боковая сила, которую можно представить как

$$F_y = Ld \frac{\rho v^2}{2} c_{yvibr} \sin(\omega t). \quad (40)$$

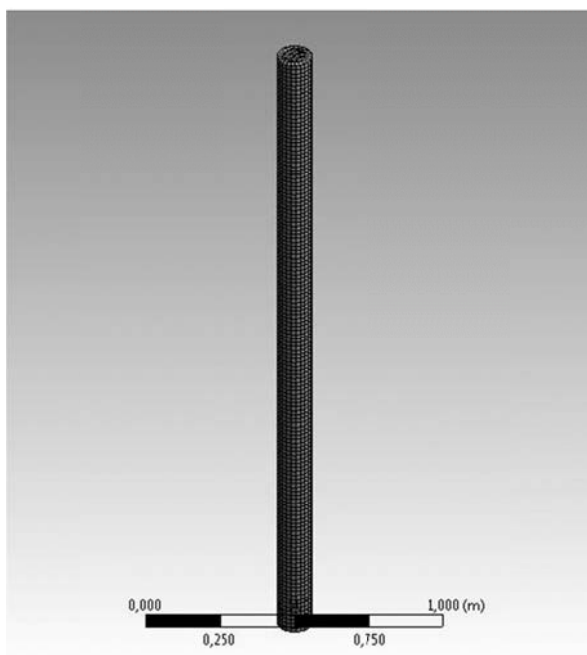


Рисунок 10 – Трехмерная модель цилиндрического стержня, разбитая на конечные элементы

Частота ω определяется как

$$\omega = 2\pi \frac{Sh}{d} v. \quad (41)$$

где Sh – число Струхаля;
 d – диаметр стержня;
 v – скорость потока.

Согласно экспериментальным данным [6], для поперечных колебаний $Sh = 0,2$, а для продольных – $Sh = 0,35$.

Полученные с помощью расчета МКЭ данные по перемещениям цилиндра были сопоставлены с аналитическими оценками (рисунки 11 и 12). Сравнение результатов показывает достаточно хорошее согласование данных методов. Определенные различия могут быть связаны с тем, что одномерная балочная модель, на которой основан аналитический метод, удовлетворительно описывает деформацию упругого стержня в целом, но неприемлема для анализа местных деформаций и напряжений в районе заделки [7].

Верификация численного метода расчета течений в областях с изменяемой геометрией

В процессе решения гидроупругой задачи возникает необходимость проводить расчет характеристик течения вязкой жидкости в области с изменяемой геометрией. Данные о перемещениях конструкции передаются в гидродинамический решатель, где происходит перестроение расчетной сетки и с учетом этих изменений пересчитываются характеристики потока и значения действующих гидродинамических сил. В задаче о колебаниях цилиндра гидродинамический решатель AnsysFluent использует встроенный алгоритм деформации и перестроения элементов расчетной сетки («динамические сетки»). [8]

Верификация методов, применяемых при расчетах на динамических сетках, подробно описана в работе [9]. В качестве объекта рассматривалось крыло малого удлинения, оснащенное концевыми шайбами для устранения краевых эффектов, а также способное вращаться относительно некоторой оси.

Эксперимент был воспроизведен численно, с использованием динамических расчетных сеток. Сопоставление экспериментальных ($C_y = 0,26$) и расчетных ($C_y = 0,27$) амплитудных значений коэффициента подъемной силы позволило сделать вывод о допустимости применения динамических расчетных сеток в гидродинамических расчетах.

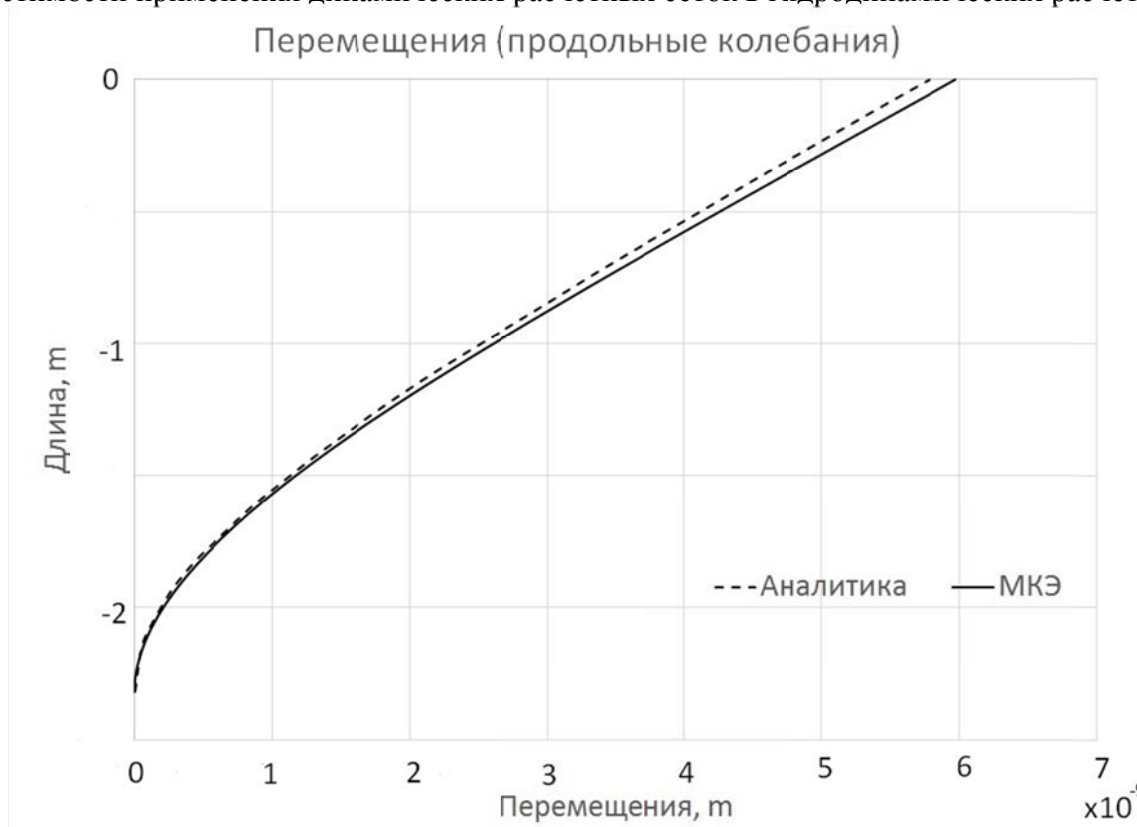


Рисунок 11 – Перемещения цилиндрического стержня (продольные колебания)

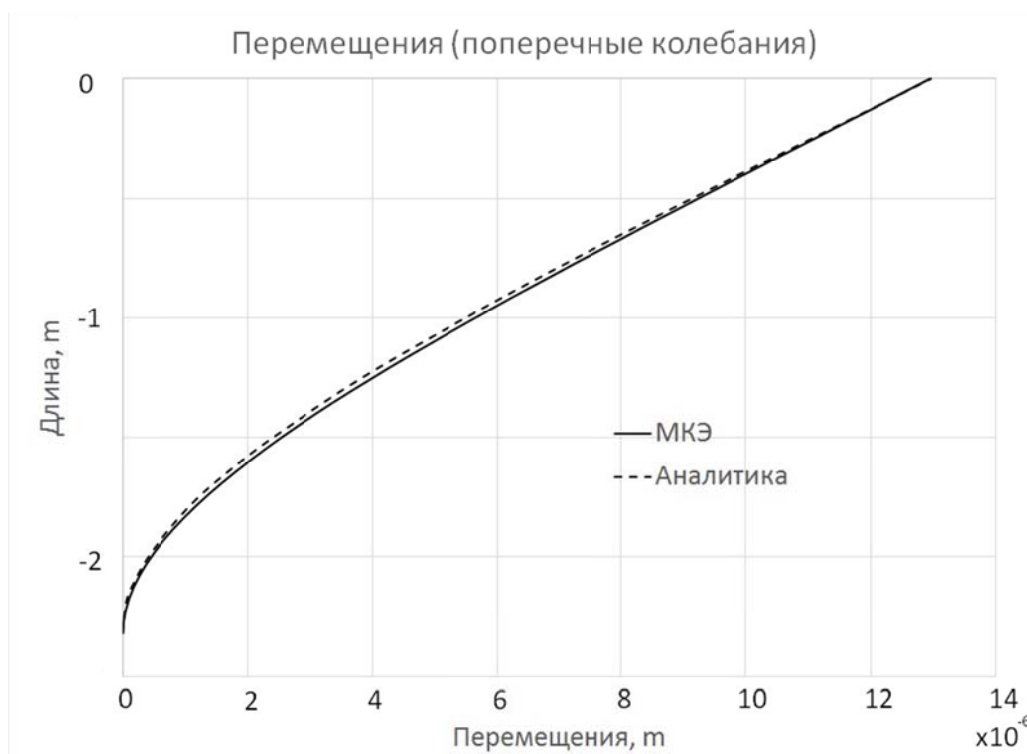


Рисунок 12 – Перемещения цилиндрического стержня (поперечные колебания)

Также был произведен расчет колебаний крыла в водной среде для двух режимов, соответствующих числам Струхала $Sh = 0,91$ и $Sh = 3,65$. Сравнение полей скоростей в среднем сечении крыла для этих режимов представлено на рисунке 13. Результаты расчета были сопоставлены с аналитическими оценками, соответствующими теории квазиустановившегося обтекания [10] и теории нестационарного обтекания тонкого крыла [11] (таблица 4). Анализируя эти данные, можно отметить, что при небольших частотах колебаний амплитудные значения коэффициентов боковой силы и вращательного момента, действующих на крыло, хорошо согласуются с оценками, основанными на теории квазиустановившегося обтекания. При более высоких частотах колебаний, когда реализуется существенно нестационарное движение, теория квазиустановившегося обтекания является оценкой снизу, а теория нестационарного обтекания – оценкой сверху. Таким образом, получены физически обоснованные значения гидродинамических сил, действующих на объект, совершающий колебания в потоке жидкости, что позволяет использовать современные методы вычислительной гидродинамики при решении гидродинамической части сопряженной задачи.

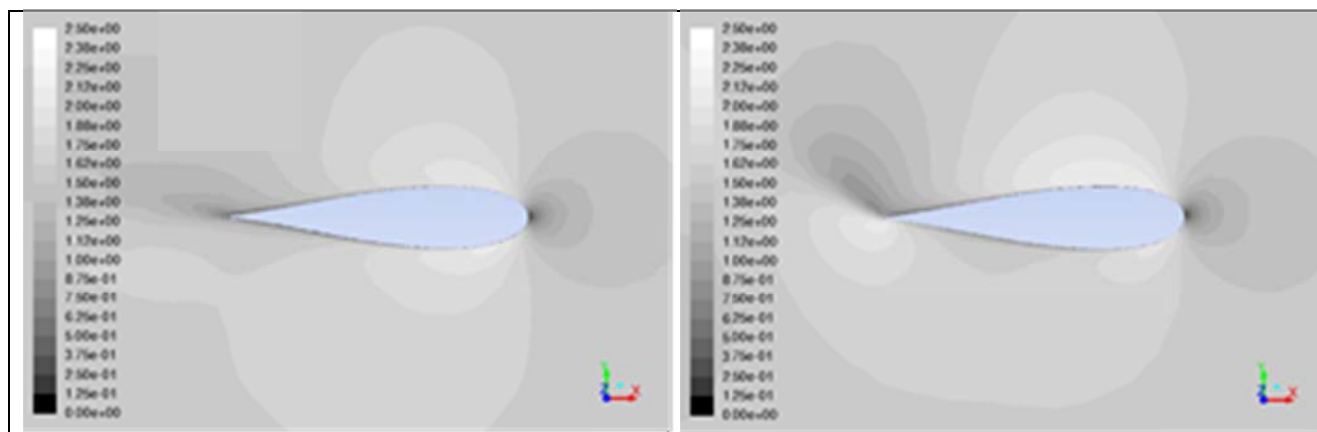


Рисунок 13 – Поле скорости (м/с) в среднем сечении крыла при $Sh = 0,91$ (слева) и при $Sh = 3,65$ (справа)

Таблица 4 – Результаты гидродинамического расчета

Метод	$C_v, Sh = 0,91/3,65$	$M_z, Sh = 0,91/3,65$
Теория квазиустановившегося обтекания	0,58/0,95	0,07/0,18
Численный расчет	0,58/1,45	0,08/0,30
Теория нестационарного обтекания	0,80/1,75	0,11/0,40

Заключение

В работе проведена верификация численных методов, используемых при решении гидроупругой задачи.

Для верификации гидродинамической части результаты расчета обтекания цилиндрического стержня большого удлинения потоком жидкости сопоставлены с экспериментальными данными, после чего численный метод был использован при определении гидродинамических сил, действующих на стержень конечной длины, один конец которого заделан, а другой – свободен. Полученные коэффициенты стационарных и нестационарных гидродинамических сил были использованы для решения динамической части задачи.

Верификация динамической части проводилась методом сопоставления результатов, полученных с помощью численного расчета методом конечных элементов с аналитическими оценками. Для аналитического определения напряженно-деформируемого состояния рассматриваемого стержня под воздействием гидродинамических сил была разработана методика, реализованная в программе для ЭВМ.

Для оценки возможности расчета течений в областях с изменяемой геометрией проведено сопоставление результатов численного расчета колебаний крыла в потоке жидкости с экспериментальными данными и аналитическими оценками.

Результаты проведенного исследования показывают возможность численного решения гидроупругой задачи в сопряженной постановке. Это позволит повысить качество проектирования конструкций, взаимодействующих с потоком жидкости, за счет возможности определения их напряженно-деформированного состояния для различных, в том числе резонансных, режимов эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунов, В.А. Численное моделирование процессов деформирования судового корпуса при динамическом воздействии водо-воздушной среды / В.А. Коршунов, Д.А. Пономарев, А.А. Родионов // Морской Вестник, спец. выпуск №1 (13) – Труды Российского НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова, вып. №4, Материалы научно-технической конференции по строительной механике корабля памяти акад. Ю.А. Шиманского 2017, С.49–55.
2. Снегирев, А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. Пособие/ А.Ю. Снегирев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.
3. Девнин, С.И. Аэрогидродинамика плохообтекаемых конструкций. Справочник / С.И. Девнин. – Л.: Судостроение, 1983. – 331 с.
4. Сухоруков, А.Л. Срывной флаттер как одна из причин возникновения вибраций подъемно-мачтовых устройств/А.Л. Сухоруков// Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3, С. 42 – 66
5. Сухоруков А.Л. Изгибно-крутильный флаттер как причина возникновения гидродинамической неустойчивости подъемно-мачтовых устройств // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 7, № 1, С. 87 – 93
6. Девнин, С.И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании/С.И. Девнин. – Л.: Судостроение, 1975. – 192 с.
7. Колесников, К.С. Динамика ракет/К.С. Колесников. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
8. Пономарев, Д.А. Современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. / Д.А. Пономарев // Морские Интеллектуальные Технологии, Научный журнал №3 (37) Т. 3 2017, С. 30–40
9. Коваль, К.А. Результаты верификации численного метода расчета гидродинамических и гидроакустических характеристик плавникового движителя/ К.А. Коваль, А.Л. Сухоруков, И.А. Чернышев // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 4, С. 60 – 72
10. Фын, Я.Ц. Введение в теорию аэроупругости / Я.Ц. Фын. – М.: Физматлит, 1959. – 524 с.
11. Бисплингхофф, Р.Л. Аэроупругость / Р.Л. Бисплингхофф, Х. Эшли, Р.Л. Халфмэн. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 799 с.

Коваль Кирилл Алексеевич
АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт–Петербург
Инженер 2 категории
191119, г. Санкт–Петербург, ул. Марата, 90
Тел. (812) 494–17–08
E–mail: koval.kir2014@yandex.ru

Сухоруков Андрей Львович
АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт–Петербург
Доктор технических наук, заместитель начальника
отдела
191119, г. Санкт–Петербург, ул. Марата, 90
Тел. (812) 494–19–40
E–mail: su_andr@yahoo.com

K.A. KOVAL, A.L. SUKHORUKOV

VERIFICATION OF THE NUMERICAL METHOD FOR CALCULATION OF CONSTRUCTION HYDROELASTIC OSCILLATIONS IN FLUID FLOW

Abstract. *Analysis of construction hydroelastic oscillations in fluid flow is the problem of current interest. Numerical simulation of such process can be useful in design of retractable gears of marine objects because their stress–strain state may be determined for different operating regimes. The numerical methods used in the coupled analysis of the hydroelastic problem were verified in this work. Calculated hydrodynamic characteristics of the slender cylindrical bar were compared with experimental data. Stress–strain state of the cylindrical bar with one fixed end and one free end was determined using finite element method and created analytical method. Verification of the numerical method for calculation of characteristics of fluid flow in dynamic mesh zones was based on comparison of the results of numerical simulation for flapping wing and experimental data and the results of analytical approaches.*

Keywords: *hydroelasticity, oscillations, retractable gear, hydrodynamic characteristics.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korshunov, V.A. Chislennoyemodirovaniye protsessov deformirovaniya sudovogo korpusa pri dinamicheskom vozdeystvii vodo–vozdushnoy sredy / V.A. Korshunov, D.A. Ponomarev, A.A. Rodionov // Morskoy Vestnik, spets. vypusk №1 (13) – Trudy Rossiyskogo NTO sudostroiteley im. akad. A.N. Krylova, vyp. №4, Materialy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii po stroitelnoy mekhanike korablya pamyati akad. YU.A. Shimanskogo 2017, S.49–55.
2. Snegirev, A.YU. Vysokoproizvoditelnyye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoye modelirovaniye turbulentnykh techeniy: Ucheb. Posobiye/ A.YU. Snegirev. – SPb.: Izd–vo Politekh. un–ta, 2009. — 143 s.
3. Devnin, S.I. Aerogidrodinamika plokhoohtekayemykh konstruksiy. Spravochnik / S.I. Devnin. – L.: Sudostroyeniye, 1983. – 331 s.
4. Sukhorukov, A.L. Sryvnoy flutter kak odna iz prichin vozniknoveniya vibratsiy pod"yemno–machtovykh ustroystv/A.L. Sukhorukov// Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2014. T. 7, № 3, S. 42 – 66
5. Sukhorukov A.L. Izgibno–krutilnyy flutter kak prichina vozniknoveniya gidrodinamicheskoy neustoychivosti pod"yemno–machtovykh ustroystv // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2015. T. 7, № 1, S. 87 – 93
6. Devnin, S.I. Gidrouprugost konstruksiy pri otryvnom obtekanii/S.I. Devnin. – L.: Sudostroyeniye, 1975. – 192 s.
7. Kolesnikov, K.S. Dinamika raket/K.S. Kolesnikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 376 s.
8. Ponomarev, D.A. Sovremennyye metody resheniya zadachi vzaimodeystviyakonstruksiy s vodo–vozdushnoy sredoy. / D.A. Ponomarev // Morskiye Intellektualnyye Tekhnologii, Nauchnyy zhurnal №3 (37) T. 3 2017, S. 30–40
9. Koval, K.A. Rezultaty verifikatsii chislennoy metoda rascheta gidrodinamicheskikh i gidroakusticheskikh kharakteristik plavnikovogo dvizhitelya/ K.A. Koval, A.L. Sukhorukov, I.A. Chernyshev // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016. T. 9, № 4, S. 60 – 72
10. Fyn, YA.TS. Vvedeniye v teoriyu aerouprugosti / YA.TS. Fyn. – M.: Fizmatlit, 1959. – 524 s.
11. Bisplinghoff, R.L. Aerouprugost / R.L. Bisplinghoff, KH. Eshli, R.L. Khalfmen. – M.: Izd–vo inostrannoy literatury, 1958. – 799 s.

Koval Kirill Alekseevich
JSC "TsKB MT" Rubin ", St. Petersburg
Engineer category 2
191119, St. Petersburg, ul. Marata, 90
Tel. (812) 494–17–08
E–mail: koval.kir2014@yandex.ru

Sukhorukov Andrey Lvovich
JSC "TsKB MT" Rubin ", St. Petersburg
Doctor of Technical Sciences, Deputy Head
department
191119, St. Petersburg, ul. Marata, 90
Tel. (812) 494–19–40
E–mail: su_andr@yahoo.com

И.Н. МОРЕВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РУЛЕВОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. Рассмотрены требования Правил Регистра к нормам эффективности рулевого устройства.

Ключевые слова: судно, управляемость, перекладка руля, рулевое устройство, гребной винт, перо руля, циркуляция.

Введение.

Управляемость судна при современном уровне знаний и возможностей экспериментальной техники на этапе проектирования оценивается приближенно. Между тем, управляемость судна является основным мореходным качеством, обеспечивающим безопасность мореплавания. В особенности это относится к судам, перевозящим опасные грузы, и крупным судам с большой полнотой обводов. В связи с этим управляемость каждого судна должна проверяться во время сдаточных испытаний в натурных условиях. Именно так построены требования ИМО, изложенные в «Стандартах маневренных качеств судов» [2]. В соответствии с требованиями «Правил классификации и постройки морских судов Российского Морского Регистра Судоходства» [1] (далее в тексте – «Правила»), управляемость судна проверяется на этапе проектирования сравнением расчетных показателей управляемости с нормативными.

Таким образом, к настоящему времени не выработано единого подхода к нормированию управляемости, более того, «Правила» и «Стандарты маневренных качеств судов» существенно разнятся между собой.

Постановка задачи.

В настоящей работе рассматриваются только требования Правил Регистра.

Следует, однако, иметь виду, что нормы эффективности рулевого устройства по Правилам следует рассматривать как минимальные. Фактические значения характеристик управляемости (относительный или абсолютный диаметр циркуляции при полной перекладке руля и относительный диаметр самопроизвольной циркуляции при непереложном руле) должны быть приемлемы для обычных условий эксплуатации судов рассматриваемого типа.

Расчет завершается Заключением об эффективности рулевого устройства и приемлемости эксплуатационных характеристик управляемости. При необходимости приводятся рекомендации по улучшению управляемости.

Эффективность рулевого устройства, в соответствии с Правилами [1] проверяется для судов длиной более 20 м (кроме ледоколов) неограниченного и ограниченного района плавания, имеющих следующие геометрические характеристики:

$$\begin{aligned}\frac{L_{WL}}{B} &= 3,2 \dots 8,0; C_B = 0,45 \dots 0,85; \\ \frac{L_{WL}}{d} &= 8,3 \dots 28,6; C_P = 0,55 \dots 0,85; \\ \frac{L_{WL}}{B} &= 1,5 \dots 3,5; \sigma_k = 0,80 \dots 0,99.\end{aligned}$$

Коэффициент продольной полноты равен:

$$C_P = \frac{C_B}{C_M},$$

а коэффициент полноты кормовой подводной части диаметрally:

$$\sigma_k = 1 - \frac{2(f - f_0)}{L_{WL} d},$$

где f – площадь боковой проекции подзора, [м²];

f_0 – вводится для двухвинтовых судов; равно площади проекции выкружек на площадь f , [м²].

Эффективность рулевого устройства для рулей всех типов, кроме IV, X, XIII определяется по формуле

$$E_p = \mu_1 \frac{A_R}{A_L} \left(1 + C_{HB} \frac{A_{RDP}}{A_R} \right) (1 - W)^2,$$

где A_R – площадь пера руля, [м²];

A_L – площади погруженной части диаметральной, [м²];

A_{RDP} – площадь пера руля, попадающая в струю гребного винта в непереложенном положении, [м²].

$$\mu_1 = \frac{6,28}{1 + \frac{2A_R}{h_R^2}}.$$

$W = 0,3C_B$ – для руля в ДП (диаметральная плоскость) за гребным винтом;

$W = 0$ – для руля в ДП при отсутствии гребного винта перед ним;

$W = 0,4C_B - 0,13$ – для бортовых рулей.

$$C_{HB} = \frac{9,38T_E}{(1-t)[D_P v_0 (1-W_T)]^2},$$

причем для рулей, не работающих непосредственно за гребным винтом, $C_{HB} = 0$.

T_E – тяга гребного винта, [кН];

t, W_T – коэффициенты взаимодействия винта и корпуса.

Эффективность рулевого устройства для рулей типов IV, X, XIII определяется по формуле:

$$E_{pp} = 1,3\mu_2 \frac{A_k}{A_L} (1 - W)^2,$$

где

$$\mu_2 = \frac{6,28 \sqrt{\frac{b_R}{b_{R+RP}}}}{1 + \frac{2b_R^2}{A_k}} + \frac{1,4C_{HB}}{1 + 0,5 \left(\frac{b_{R+RP}^2}{A_k} \right)^2}.$$

A_k – суммарная площадь руля и кронштейна или рудерпоста, расположенная в пределах h_R (высота пера руля), [м²];

b_R – ширина пера руля, [м];

b_{R+RP} – суммарная ширина пера руля и рудерпоста, [м].

Эффективность рулевого устройства, вычисленная по формулам, рассматривается как фактическая эффективность рулевого устройства судна. Она должна быть не менее нормативных значений эффективностей:

E_1 – назначенной исходя из условий устойчивости на курсе и поворотливости в тихую погоду;

E_2, E_3 – обеспечивающих приемлемую управляемость судна на ходу при ветре как на свободной воде (по углу дрейфа), так и в канале (по боковому смещению).

Значения E_1 определяются по графикам, как $E_1 = f(\sigma_k, C_P)$.

Рисунок 1 – для всех одновинтовых судов кроме буксиров, спасательных и рыболовных судов.

Рисунок 2 – для всех двух- и трехвинтовых судов кроме буксиров, спасательных и рыболовных судов.

Рисунок 3 – для буксиров, спасательных и рыболовных судов.

E_2 вычисляется по формуле:

$$E_2 = \frac{3,8A_3}{v_0^2 A_4} \left(1 - 0,0667 \frac{A_3}{A_4} \right) \left\{ 1 + (\lambda_R - 1) [0,33 + 0,015(v_0 - 7,5)] - 5 \frac{x_0}{L_1} \right\},$$

где A_3 – площадь боковой парусности при минимальной осадке, соответствующей полному погружению руля, [м²];

A_4 – площадь подводной части диаметральной при минимальной осадке, соответствующей полному погружению руля, [м²];

x_0 – расстояние от середины длины L_1 при минимальной осадке, соответствующей полному погружению руля, до центра тяжести площади A_3 , [м].

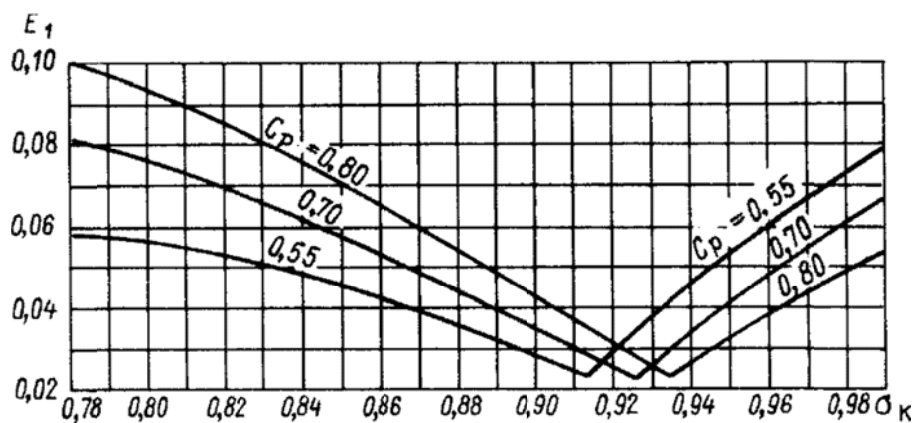


Рисунок 1 – Зависимость $E_1 = f(\sigma_k, C_p)$ одновинтовых судов

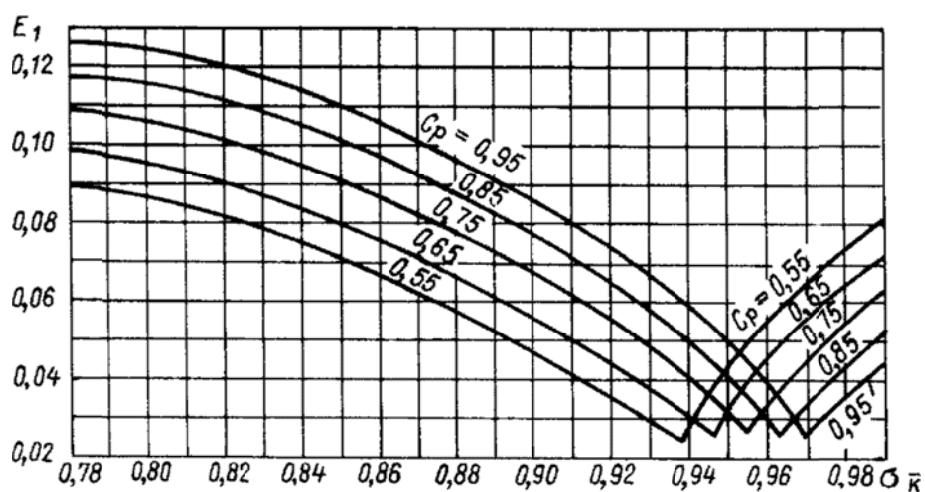


Рисунок 2 – Зависимость $E_1 = f(\sigma_k, C_p)$ двух- и трехвинтовых судов

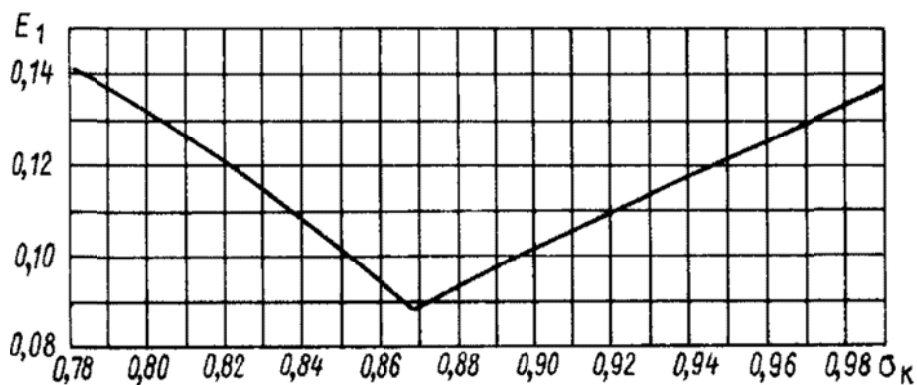


Рисунок 3 – Зависимость $E_1 = f(\sigma_k)$ для буксиров, спасательных и рыболовных судов

Для рулей типов IV, X, XIII – $\lambda_R = \frac{h_R^2}{A_k}$.

E_3 определяется как

$$\begin{cases} E_3 = 0,003 + 0,01(\lambda_R - 1) + 0,01 \frac{A_{VL}}{A_L} \left(1 - 3 \frac{x_{VL}}{L_{WL}} \right), L_{WL} \geq 70\text{м} \\ 0, L_{WL} \leq 70\text{м} \end{cases}$$

Однако, для всех судов (кроме спасательных, рыболовных судов и буксиров с $\sigma_k > 0,865$), если E_1 больше E_2 или E_3 , допускается принимать $E_1 = 0$, если диаметр установившейся циркуляции судна при руле, переложенном на 35° будет:

$$D_C \leq 4L,$$

а диаметр самопроизвольной циркуляции при непереложенном руле:

$$D_{CS} \geq 6,7D_C.$$

Эти два условия должны проверяться испытаниями модели судна. Для судов с водоизмещением при осадке по ЛГВЛ $\Delta > 60000$ т проверка условий испытаниями модели судна обязательна.

Закключение.

По результатам расчета должно быть сделано заключение, в котором должно быть ясно указано удовлетворяются ли требования Правил или нет, и высказаны соображения по улучшению управляемости судна в последнем случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства. – С – Пб.: Транспорт, 2007 г. – 960 с.
2. International Maritime Organization. Standards for Ship Manoeuvrability/IMO, Resolution MSC.137(76) adopted 5 December 2002.London.
3. Гофман А. Д. Движительно–рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник/ А. Д. Гофман.– Л.: Судостроение, 1988г. – 360 с.

Морева Ирина Николаевна

Севастопольский государственный университет,

г. Севастополь

кандидат технических наук, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение»

Тел.: +78692544232

E-mail: i.n.moreva@mail.ru

I.N. MOREVA

THE EFFICIENCY OF THE RUDDER GEAR

Abstract. *Requirements of Rules of the Register to standards of efficiency of the rudder gear are considered.*

Keywords: *ship, controllability, rudder deflection, rudder gear, propeller, rudder blade, circulation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rules of classification and construction of sea vessels. Russian Maritime Register Of Shipping. – S–Pb.: Transport, 2007, 960 p.
2. International Maritime Organization. Standards for Ship Manoeuvrability / IMO, Resolution MSC.137 (76) adopted 5 December 2002.London.
3. Hoffman Ad Propulsion and steering complex and maneuvering the ship. Handbook / A. D. Hoffman. – L.: Shipbuilding, 1988, 360 p.

Moreva Irina Nikolaevna

Sevastopol state University, Sevastopol

Candidate of technical Sciences,

Associate Professor the Department «Ocean Engineering and Shipbuilding»

Ph: + 78692544232

E-mail: i.n.moreva@mail.ru

А.Р. АБЛАЕВ, Р.Р. АБЛАЕВ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООТДАЧИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБНОМ ПОЛОСТИ СУДОВЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Аннотация. Приводится алгоритм определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубном пространстве для судовых охладителей масла и воды в компьютерно-интегрированной системе

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплоотдача, гидравлическое сопротивление.

Введение

Расчет коэффициентов теплоотдачи α является обязательным элементом структур расчета коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате. Расчет α специфичен практически для каждого сочетания признаков: процесса теплообмена, формы теплопередающего элемента, типа теплопередающей поверхности, пространственного расположения аппарата. Каждый из этих признаков, в особенности второй и третий, имеет большое число состояний [1-3].

В технической литературе имеется множество данных по коэффициентам теплоотдачи, большей степенью разрозненных, не удовлетворяющих условиям совместности [4-9].

Цель и задачи исследования

Систематизировать данные по теплогидродинамическому расчету трубного пространства судовых кожухотрубчатых охладителей масла и воды и представить алгоритмические модели для компьютерно-интегрированного способа расчета.

Основной раздел

Во многих судовых кожухотрубчатых охладителях масла и воды [10] вход жидкости в трубу совпадает с началом теплообменного участка. В таких случаях из-за небольшой длины труб течение не успевает стабилизироваться, т.е. процесс теплообмена протекает в начальном гидродинамическом участке при одновременном развитии скоростных и температурных полей.

Если при стабилизированном течении в круглой трубе $Nu_x = f(Re^{-1}x/d)$, то в гидродинамическом начальном участке

$$Nu_x = f(Re, Pr, x/d) \quad (1)$$

и теплоотдача выше, чем при стабилизированном течении, что объясняется более высокими значениями скорости вблизи стенки и наличием радиальных составляющих скорости.

Расчет для значений Pr от 0,1 до 1000 в круглой трубе вблизи от входа дает следующее уравнение для среднего теплообмена:

$$Nu = 0,664 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-0,5} Pr^{0,33}. \quad (2)$$

Результаты расчета теплоотдачи в начальном гидродинамическом участке круглой трубы с точностью $\pm 5\%$ можно описать уравнением [1]

$$e = \frac{Nu}{Nu_{ст}} = 0,6 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right), \quad (3)$$

где $Nu_{ст}$ – среднее число Нуссельта на участке от $x = 0$ до $x = l$ при стабилизированном течении.

Зависимость (3) справедлива при значениях $Re^{-1} \cdot l/d < 0,1$. Она хорошо согласуется с экспериментальными данными, но не учитывает влияния изменения физических свойств жидкости с температурой.

Влияние переменности физических свойств учитывается введением аналогичного параметра, как и в случае стабилизированного течения.

Детальное исследование теплообмена в начальном участке трубы при $q_c = const$ приближенным методом теории пограничного слоя дано в [1]. Получено, что случае $\Delta < 1$ местное число Нуссельта равно

$$Nu_x = \frac{\alpha_x d}{\lambda} = \frac{1}{\frac{3}{8} \Delta - 4 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d}}. \quad (4)$$

Для малых значений параметра $Re^{-1} \cdot x/d$, т.е. вблизи входа в трубу, где толщина пограничного слоя невелика, найдено выражение

$$Nu_x = 0,46 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{-0,5} Pr^{0,33}. \quad (5)$$

Для всей области начального гидродинамического участка рекомендуется соотношение

$$e = \frac{Nu_x}{Nu_{ct}} = 0,35 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{-1/6} \left(1 + 2,85 \frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{0,42}, \quad (6)$$

где Nu_{ct} – число Нуссельта для случая стабилизированного течения при $q_c = const$.

Уравнение (6) описывает результаты расчета в пределах $10^{-4} < Re^{-1} \cdot x/d \leq 0,064$ и $0,7 < Pr < 1000$ с точностью около 6%. При $Re^{-1} \cdot x/d > 0,064$ профиль скорости становится параболическим и $Nu_x = Nu_\infty$. Уравнение (6) неплохо согласуется с опытными данными в случае постоянных физических свойств теплоносителя.

Для расчета теплообмена в случае переменных физических свойств (прежде всего вязкости) с изменением температуры предлагается зависимость

$$Nu_x = 1,31 e \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3} \left(1 + 2 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{-1/6}, \quad (7)$$

где e определяется по уравнению (6).

Уравнение (7) охватывает всю протяженность термического начального участка, включая и область начального гидродинамического участка, где происходит формирование профиля скорости.

Теплоотдача при ламинарном режиме

При ламинарном течении перенос теплоты от одного слоя жидкости к другому в направлении нормали к стенке осуществляется путем теплопроводности. В то же время каждый слой имеет в общем случае различную скорость продольного движения. Поэтому наряду с поперечным переносом теплоты путем теплопроводности происходит также конвективный перенос теплоты в продольном направлении. Вследствие этого теплообмен при ламинарном режиме течения зависит от гидродинамической картины движения.

Рассмотрим развитие процесса теплообмена вдоль трубы. Пусть во входном сечении температура жидкости постоянна и по величине отличается от температуры стенки трубы. По мере движения потока между жидкостью и стенкой происходит процесс теплообмена и температура жидкости постепенно изменяется. Вначале вблизи от входного сечения изменение температуры происходит лишь в тонком слое около поверхности. Затем по мере удаления от входного сечения все большая часть потока вовлекается в процесс теплообмена. Таким образом, развитие процесса теплообмена внутри труб вначале происходит качественно. Около поверхности трубы образуется тепловой пограничный слой, толщина которого постепенно увеличивается в направлении движения потока. На некотором расстоянии от входа трубы $l_{н.т}$ тепловые пограничные слои смыкаются, и в процессе теплообмена участвует далее весь поток жидкости. Расстояние $l_{н.т}$ может быть приближенно оценено по зависимости $l_{н.т} \approx 0,05d Re Pr$.

Обычно на практике ламинарный режим встречается при течении достаточно вязких теплоносителей, таких как различные масла применяемые в судостроении, для которых значения Pr , для рабочих режимов находятся в пределах от 0,5 до 2500. В этих условиях длина теплового начального участка стабилизации $l_{н.т}$ оказывается достаточно большой.

Значительное влияние на интенсивность теплоотдачи может оказывать зависимость физических свойств жидкости (в первую очередь вязкости) от температуры. Изменение температуры по сечению трубы приводит к изменению вязкости, причем чем сильнее перепады температур, тем сильнее меняются вязкость и другие физические параметры (теплопроводность, теплоемкость) по сечению трубы. Изменение вязкости приводит к изменению профиля поля скорости, что в свою очередь отражается на интенсивности теплообмена. На практике обычно скорость и температура на входе в трубу имеют профили, близкие к равномерным. Для этих условий расчет среднего коэффициента теплоотдачи при ламинарном режиме течения жидкости в трубах при $l/d > 10$ и $Re_{ж} > 10$ может проводиться по формуле

$$Nu_{дж} = 1,4 \left(Re_{дж} \frac{d}{l} \right)^{0,4} Pr_{ж}^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

Индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства выбираются по средней температуре жидкости и стенки соответственно.

Множитель $\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$ учитывает зависимость физических свойств (в основном вязкости) от температуры и влияние направления теплового потока. Соотношение (8) справедливо для значений $0,06 < \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} < 10$.

Соотношение (8) правомерно при значениях $Re_{дж} \frac{d}{l} Pr_{ж}^{5/6} > 15$.

При меньших значениях этой величины, т.е. для труб весьма большой длины:

$$l/d > 0,067 Re_{дж} Pr_{ж}^{5/6}, \quad (9)$$

величина $Nu_{дж}$ становится постоянной, что отвечает условиям стабилизации интенсивности теплоотдачи. При выполнении этих условий вместо соотношения (8) для определения среднего коэффициента теплоотдачи может быть рекомендовано приближенное соотношение

$$Nu_{дж} \approx 4 \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (10)$$

Теплоотдача при турбулентном движении в круглых трубах при установившемся течении

При турбулентном режиме движения перенос теплоты внутри жидкости осуществляется в основном путем перемешивания. При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура жидкости практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри тонкого слоя у поверхности.

В [1] проведен аналитический расчет стабилизированной теплоотдачи. Расчетами охвачен интервал чисел Re от 10^4 до $5 \cdot 10^6$ и Pr от 0 до 2000. Результаты, полученные при $Pr > 0,5$, обобщены зависимостью

$$Nu = \frac{\frac{1}{8} \xi Re Pr}{k_1 + 12,7 \sqrt{\frac{1}{8} \xi (Pr^{2/3} - 1)}}, \quad (11)$$

где $k_1 = 1 + 900 / Re$;

$$\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}.$$

Среднее отклонение экспериментальных значений Nu от рассчитанных по (11) составляет $\pm(4-5)\%$ в интервалах $4 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$ и $0,5 \leq Pr < 5 \cdot 10^5$.

На практике для расчета теплоотдачи часто пользуются формулой [2]

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l, \quad (12)$$

где ε_l – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы.

Формула (12) получена на основе обобщения различных опытных данных в интервалах чисел Re от 10^4 до $5 \cdot 10^6$ и Pr от 0,6 до 2500. За определяющую температуру здесь принята средняя температура жидкости, а за определяющий размер – диаметр трубы.

Коэффициент $\varepsilon_l = 1$, если $l/d > 50$. При $l/d < 50$ необходимо учитывать влияние теплового начального участка.

На основании анализа расчетов коэффициентов теплоотдачи в трубной полости разработана алгоритмическая модель расчета для судовых охладителей, представленная на рисунке 1.

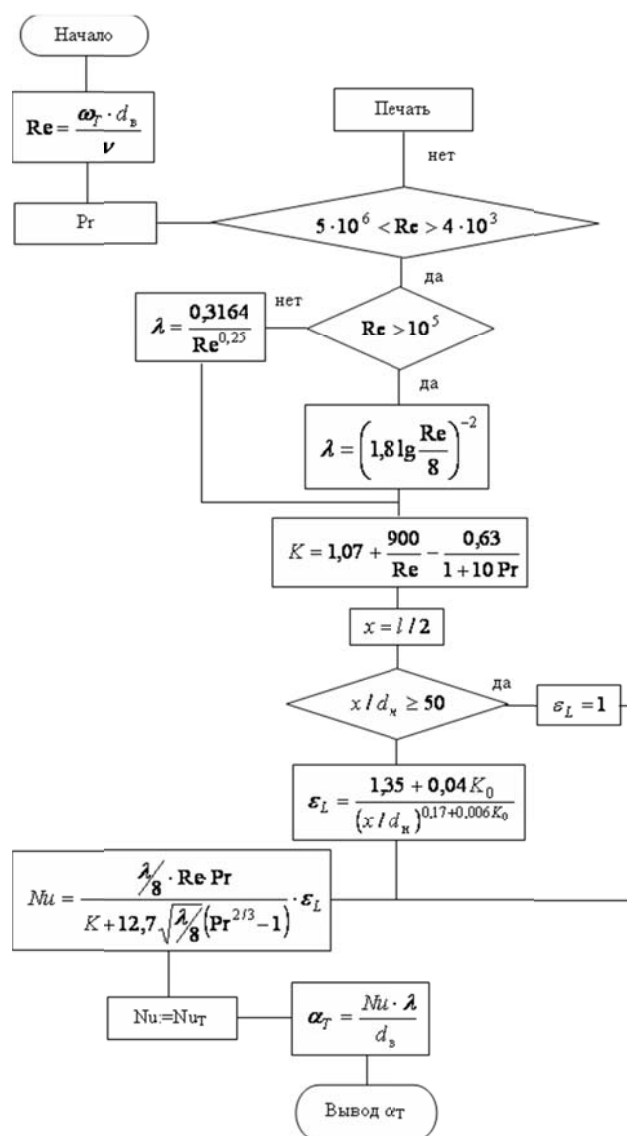


Рисунок 1 – Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве

Расчет гидравлического сопротивления в трубной полости

Анализ режимов работы охладителей масла и воды показал, что режимная характеристика течения охлаждающей жидкости в трубной полости находится в пределах $Re > 2000$. Поэтому из анализа расчетных формул для определения коэффициентов сопротивления трения принято уравнение

$$\lambda = 0,0173 + 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot Re, \quad (13)$$

для режимов $2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 4 \cdot 10^3$.

Для режимов $Re > 4 \cdot 10^3$ использована формула [11]

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \lg Re - 1,64)^2}. \quad (14)$$

Потеря давления на преодоление местных сопротивлений $\Delta P_{\text{мес}}$, которые встречаются по пути движения потока воды в аппарате, связаны с ударами, расширениями и сужениями потока при входе и выходе его в патрубках

$$\Delta P_{\text{мес}} = \left(\sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{\rho w^2}{2}, \quad (15)$$

где $\frac{\rho w^2}{2}$ – скоростной, динамический напор, Па;

$\sum_{i=1}^n \zeta_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений, зависящая исключительно от конструкции охладителя и его элементов. Значения коэффициентов местных сопротивлений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование	Значение
Вход и выход в патрубках	1,5
Поворот на 180° при переходе из одного пучка трубок в другой	2,5
Выход из трубной полости	1,0

При входе потока в прямую трубу постоянного поперечного сечения (рисунок 2) явление определяется двумя параметрами: относительной толщиной δ_1 / d_b стенки входной кромки трубы и относительным расстоянием b / d_b от обреза трубы до стенки, в которую она заделана.

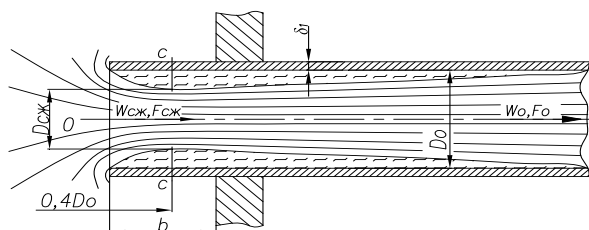


Рисунок 2 – Схема потока при входе в трубную полость

Значения местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость приняты в соответствии с [11] рисунок 3 и аппроксимированы уравнениями вида $\zeta = a \cdot e^{-c \cdot \delta_1 / d_b}$ (таблица 2).

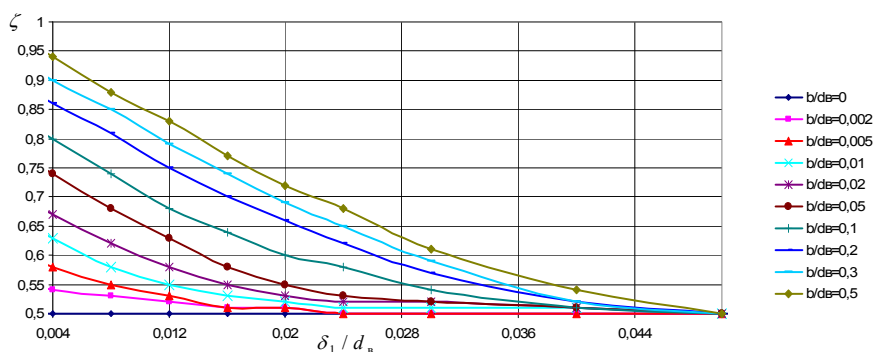


Рисунок 3 – Изменение коэффициента местного сопротивления при входе потока в трубную полость

При конической развальцовке (рисунок 4), коэффициент местного сопротивления определяется из рисунка 5 и аппроксимирован уравнением

$$\zeta = -145085(R/d_B)^6 + 79983(R/d_B)^5 - 15787(R/d_B)^4 + 1208,4(R/d_B)^3 + 7,2839(R/d_B)^2 - 7,3924(R/d_B) + 0,5 \quad (16)$$

Таблица 2 – Уравнения для расчета местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость

b/d_B	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
a	0,5415	0,5731	0,6129	0,6554	0,7219	0,7978	0,8809	0,9366
c	2,215	3,8856	5,3724	6,9608	9,3656	11,207	12,863	14,005

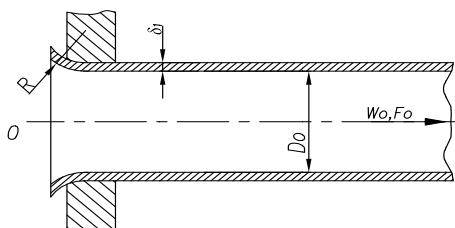


Рисунок 4 – Коническая развальцовка входного участка трубы

Наиболее значительное уменьшение сопротивления имеет место в случае входа потока через плавный коллектор, очерченный по дуге кривой (см. рисунок 4). Так, например, для кругового коллектора с относительной величиной радиуса закругления $R/d_B=0,2$ коэффициент сопротивления ζ снижается до 0,04-0,05 вместо $\zeta=1,0$ при $R/d_B=\delta_1/d_B=0$ (острая кромка).

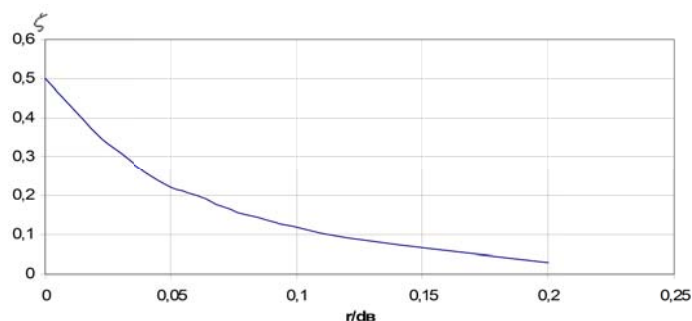


Рисунок 5 – Изменение коэффициента местного сопротивления при конической развальцовке входного участка трубы

При автоматической сварке плотным швом с конической раззенковкой в трубной решетке с наружной стороны (рисунок 6), коэффициент местного сопротивления определяется графиком представленным на рисунке 7 и аппроксимирован уравнениями, которые сведены в таблице 3.

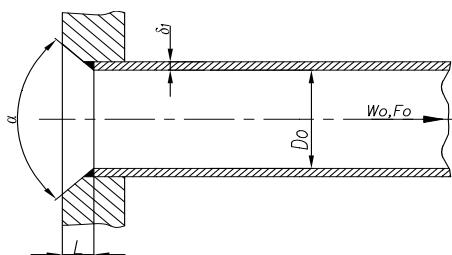


Рисунок 6 – Автоматическая сварка плотным швом с конической раззенковкой в трубной решетке с наружной стороны

Сравнительно малое сопротивление создается также при входе потока через коллекторы с прямыми образующими, оформленные в виде усеченного конуса (рисунок 6). Коэффициент сопротивления таких коллекторов зависит как от угла сужения α , так и от относительной длины l/d_b сужающегося участка. Каждой длине конического коллектора соответствует свое оптимальное значение α , при котором коэффициент сопротивления ζ принимает минимальное значение.

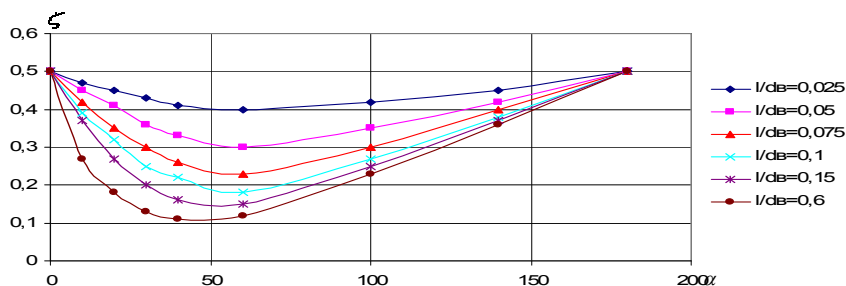


Рисунок 7 – Изменение коэффициента местного сопротивления при автоматической сварке с конической раззенковкой в трубной решетке

Таблица 3 – Уравнения для расчета местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость

l/d_b	ζ
0,025	$0,0032\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0329\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,1374\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,2058\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,05	$-0,001\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0256\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,2101\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,3792\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,075	$0,0056\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0831\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,39\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,5789\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,1	$0,0126\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,1362\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,5321\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,7188\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,15	$0,0277\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,2444\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,7898\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,9283\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,6	$-0,0403\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^5 + 0,362\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 1,2342\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 2,0269\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 1,4811\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,49$

Остальные местные сопротивления принимаются на основании многолетних испытаний судовых охладителей масла и воды [3].

Заключение

Для обеспечения высокого качества проектирования теплообменных аппаратов необходимо повысить точность теплогидродинамического расчета, чтобы он наиболее полно отражал конструктивные характеристики судовых охладителей масла и воды. Для этого был выполнен обзор и анализ уравнений для расчета коэффициента теплоотдачи и гидравлических сопротивлений по трубной полости с целью оценки возможности применения последних исследовательских достижений в алгоритмических модулях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах/ Б.С. Петухов. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Копачинский П.А. Судовые охладители и подогреватели жидкостей/ П.А. Копачинский, В.П. Тараскин. – Л.: Судостроение, 1968. – 244 с.

4. Федоровский К.Ю. Исследование теплопередачи в экологически безопасных системах охлаждения энергоустановок морских объектов / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская, В.А. Тимофеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — Орел, 2016. — № 34. — С. 105–114.
5. Сырцов Л. А. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена на основе теории подобия / Л. А. Сырцов, И. В. Наумчик, А. В. Хорошавин // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2015. — № 649. — С. 198–204.
6. Медведев В. В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве и повышение надежности судовых теплообменных аппаратов / В. В. Медведев, М. В. Лакиза // Судостроение. — 2015. — №5. — С. 40–42.
7. Луданов К.И. Обобщенные методы теплового расчета кожухотрубных теплообменников-рекуператоров / К.И. Луданов // Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — №15(137). — С. 17–28.
8. Чабаяева Е.А. Критерии эффективности теплообменников / Ю.А. Чабаяева, А.П. Булеков, В.Б. Сажин, И.А. Попов, А.А. Беднякова // Успехи в химии и химической технологии. — 2012. — № 5(134). — С. 112–115.
9. Mlynarczak A. Box coolers as an alternative to existing cooling systems / A. Mlynarczak // Scientific Journals Maritime University of Szczecin. — 2013. — nr. 36 (108) z. 2. — Pp. 131–136.
10. Охладители масла и воды кожухотрубные с прямыми трубками. Технические условия // ОСТ 5.4254-86. — М., 1987. — 51 с.
11. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ И.Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.

Аблаев Алим Рустемович
 ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Кандидат технических наук, доцент кафедры
 «Энергоустановок морских судов и сооружений»
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. 8978-810-05-64
 E-mail: ARAblaev@sevsu.ru

Аблаев Ремзи Рустемович
 ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Старший преподаватель кафедры «Экономика предприятий»
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. 8978-801-91-41
 E-mail: ablaev.expert@mail.ru

A.R. ABLAEV, R.R. ABLAEV

METHOD OF CALCULATION OF HEAT EMISSION AND HYDRAULIC RESISTANCE IN PIPE CAVITY OF SHIP COOLERS

Abstract. An algorithm over of determination of coefficient of heat emission and hydraulic resistance is brought in pipe space for the ship coolers of butter and water in the computer-computer-integrated system.

Keywords: heat-exchange vehicle, heat emission, hydraulic resistance.

BIBLIOGRAPHY

1. Petuhov, B.S. Teploobmen i soprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubah. M.: Energia, 1967.
2. Miheev, M.A., Miheeva, I.M. Osnovi teploperedachi. M.: Energia, 1977.
3. Kopachinskiy, P.A., Taraskin, V.P. Sudovie ohladiteli i podogrevateli zhidkostey. L.: Sudostroenie, 1968.
4. Fedorovsky, K. Yu., N. K. Fedorovskaya, and V. A. Timofeev. "Issledovanie teploperedachi v ekologicheski bezopasnykh sistemah ohlagdeniya energoustanovok morskikh obektov." Fundamentalnie i prikladnye problemi tekhniki i tekhnologii 34 (2016): 105–114.
5. Syrtsov, L. A., I. V. Naumchik, and A. V. Khoroshavin. "Eksperimentalnoe issledovanie konvektivnogo teploobmena na osnove teorii podobiya." Trudy voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaitskogo 649 (2015): 198–204.
6. Medvedev, V. V., and M. V. Lakiza. "Intensificaciya teploobmena v trubnom prostranstve i povishenie nadejnosti sudovih teploobmennih apparatov." Sudostroenie 5 (2015): 40–42.
7. Ludanov, K. I. "Obobshennye metody teplovogo rascheta kojuhotrubnykh teploobmennikov-rekuperatorov" Alternativnaya energetika i ekologiya 15 (2013): 17–28.
8. Chabaeva, E. A., A. P. Bulekov, V. B. Sazhin, I. A. Popov, and A. A. Bednyakova. "Kriterii effektivnosti teploobmennikov" Uspеhi v himii i himicheskoy tekhnologii 5 (2012): 112–115.
9. Mlynarczak, A. "Box coolers as an alternative to existing cooling systems." Scientific Journals Maritime University of Szczecin 36(108) z. 2 (2013): 131–136.
10. Ohladiteli masla i vodiy kojuhotrubniye s pryamymi trubkami. Tehnicheskie usloviya OST 5.4254–86. M., 1987.
11. Idelchik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. M.: Mashinostroenie, 1992.

Ablaev Alim Rustemovich
 Ph.D., Associate Professor
 Sevastopol State University
 299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33
 Ph.: 8978-810-05-64
 E-mail: ARAblaev@sevsu.ru

Ablaev Remzi Rustemovich
 Senior Lecturer
 Sevastopol State University
 299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33
 Ph.: 8978-801-91-41
 E-mail: ablaev.expert@mail.ru

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

ПОДАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ УПРУГО-МАССОВОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. В работе рассмотрена задача перемещения системы из двух масс с силовой связью между ними. Решена задача выбора управляющего воздействия в виде силы, приложенной к ведущему звену, для возврата системы на расчетный режим движения, не подверженный колебаниям координат и скоростей элементов.

Ключевые слова: упруго-массовая система, подавление колебаний, пространство состояний, мехатроника алгоритм, цифровые технологии.

Введение.

Подавление колебаний является существенной проблемой проектирования и эксплуатации механических систем [1]. К настоящему времени подавлению колебаний, возникающих в процессе движения одно- [2], двух- [3] трех- [4] и многомассовых [5] систем, а также систем с распределёнными массами [6] посвящена обширная библиография, которая продолжает пополняться новыми исследованиями [7] – [8]. Тем не менее, её полное решение затруднительно или невозможно для систем с фиксированными параметрами и произвольными законами воздействия активных сил.

Развитие средств мехатроники приводит к возможности решить ту же задачу с высокой точностью, опираясь на контролируемое изменение параметров системы, прежде всего упругих, в сочетании с управляемым силовым воздействием. Аппаратной основой такого подхода являются исполнительные механизмы с цифровым управлением, позволяющие воспроизвести движение или силу, меняющиеся во времени по запрограммированному закону. Обработка в режиме реального времени информации, поступающей с датчиков перемещений и скоростей, принципиально позволяет перейти от единичного решения задачи подавления колебаний к самоорганизующейся системе, способной противодействовать их возникновению, поддерживая заданное движение по сложной траектории.

Эти аппаратные возможности требуют соответствующего программного обеспечения, ключевой частью которого является создание необходимых алгоритмов. В настоящей работе данный подход будет рассмотрен применительно к двухмассовой системе с линейным перемещением, что, как будет показано ниже, позволяет реализовать эффективный алгоритм для стабилизации скорости системы при наличии внешних воздействий.

Цель работы. Нахождение управляющего воздействия, обеспечивающего возврат системы рассматриваемого ниже вида к равномерному движению при отклонении от него в настоящий момент времени.

Постановка задачи. Система состоит из недеформируемого звена 1, которое тянет за собой недеформируемое звено 2с помощью связующего звена, обладающего управляемыми упругими свойствами. Массы недеформируемых звеньев равны m_1 и m_2 , координаты звеньев обозначим через x_1 и x_2 .

На систему действуют движущая сила $F_{дв.}$, сила сопротивления F_c , приложенные к ведущему звену, а также силы упругости F_y , создаваемые связующим звеном и приложенные к звеньям 1 и 2 с равной величиной и разным знаком. Силы упругости могут возникать в двух режимах – обычном, когда они являются функциями от расстояния между звеньями 1 и 2 – и управляемом, когда появляется возможность задать их в виде непосредственной функции времени.

В начальный момент времени система находится в покое. Затем система движется с ускорением, достигая заданной скорости, затем движется равномерно, после чего происходит возмущающее воздействие и начинаются взаимные колебания звеньев.

Задача состоит в нахождении управляющего воздействия, которое будучи приложенным к системе, вернёт её движение на траекторию, соответствующую равномерному движению.

Материал исследования. Опишем систему с помощью непрерывного пространства состояний X , точки которого характеризуются четырьмя независимыми компонентами. Ими являются линейные координаты x_1 и x_2 и динамические импульсы $p_1=m_1 \cdot v_1$ и $p_2=m_2 \cdot v_2$. Состояние системы однозначно определяется точкой пространства $X(x_1; p_1; x_2; p_2)$.

Согласно [9], существует 6 разновидностей колебаний, будем устранять те из них, которые при неограниченном возрастании времени обладают неограниченным количеством локальных экстремумов с конечной величиной разности между последовательно взятыми максимумом и минимумом.

Выделим следующие моменты времени и интервалы между ними: t_A – начало движения из состояния покоя, с; (t_A, t_B) – разгон системы и выход на устойчивое равномерное движение; t_B – начало равномерного движения, с; (t_B, t_C) – равномерное движение; t_C – начало возмущающего воздействия, с; (t_C, t_D) – возмущающее воздействие; t_D – начало управляющего воздействия, с; (t_D, t_E) – переходный процесс, во время которого реализуется управляющее воздействие; t_E – начало нового равномерного движения, с.

Для решения задачи возврата к равномерному движению после возмущающего воздействия рассмотрим движение системы в выделенные интервалы времени в пространстве состояний.

В точке покоя система характеризуется следующими параметрами

$$X_A = \{l; 0; 0; 0\}. \quad (1)$$

Движение системы за промежуток времени от состояния покоя до состояния равномерного движения может быть описано функцией времени с компонентами

$$X_{AB}(t) = \{x_{1AB}(t); p_{1AB}(t); x_{2AB}(t); p_{2AB}(t)\}, \quad (2)$$

Найдём компоненты функции (2), используя уравнения динамики системы. Запишем

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = F_{дв}(t) - F_c(t) - F_y(x_1(t) - x_2(t) - l) \\ m_2 \cdot \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} = F_y(x_1(t) - x_2(t) - l) \end{cases}, \quad (3)$$

а также

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = -F_{u1}(t) \\ m_2 \cdot \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} = -F_{u2}(t) \end{cases}, \quad (4)$$

откуда получим

$$\begin{cases} p_{1AB}(t) = -\int_{t_A}^t F_{u1}(t) dt; \\ x_{1AB}(t) = \frac{1}{m_1} \int_{t_A}^t p_{1AB}(t) dt \\ p_{2AB}(t) = -\int_{t_A}^t F_{u2}(t) dt \\ x_{2AB}(t) = l + \frac{1}{m_2} \int_{t_A}^t p_{2AB}(t) dt \end{cases}, \quad (5)$$

Равномерное движение системы с общей скоростью $v_1=v_2=v_p$, согласно (5) равной по абсолютной величине $v_p = \frac{1}{m_1} \int_{t_A}^{t_B} F_{u1}(t) dt = \frac{1}{m_2} \int_{t_A}^{t_B} F_{u2}(t) dt$ опишем в виде функции времени

$$X_{BC}(t) = \{x_{1BC}(t); p_{1BC}(t); x_{2BC}(t); p_{2BC}(t)\}, \quad (6)$$

с компонентами

$$\begin{cases} x_{1BC}(t) = x_{1B} + v_p \cdot (t - t_B); \\ p_{1BC}(t) = m_1 \cdot v_p = \text{const} \\ x_{2BC}(t) = x_1(t) - l \\ p_{2BC} = m_2 \cdot v_p = \text{const} \end{cases}, \quad (7)$$

где l – расстояние между звеньями.

Это движение обеспечивается при равенстве нулю сил инерции, действующих в системе $F_{u1}(t) = F_{u2}(t) = 0$.

В ходе возмущающего воздействия значения сил инерции перестают быть нулевыми, поэтому движение на интервале CD запишем как

$$X_{CD}(t) = \{x_{1CD}(t); p_{1CD}(t); x_{2CD}(t); p_{2CD}(t)\}, \quad (8)$$

где

$$\begin{cases} p_{1CD}(t) = m_1 \cdot v_p - \int_{t_C}^t F_{u1}(t) dt; \\ x_{1CD}(t) = x_{1C} + \frac{1}{m_1} \int_{t_C}^t p_{1CD}(t) dt \\ p_{2CD}(t) = m_2 \cdot v_p - \int_{t_C}^t F_{u2}(t) dt \\ x_{2CD}(t) = x_{1C} - l + \frac{1}{m_2} \int_{t_C}^t p_{2CD}(t) dt \end{cases}. \quad (9)$$

В результате система оказывается в момент времени t_D в точке пространства состояний

$$X_D = \{x_{1D}; m_1 \cdot v_{1D}; x_{2D}; m_2 \cdot v_{2D}\}. \quad (10)$$

Будем искать такое переходное движение, имеющее X_D своей начальной точкой,

$$X_{DE}(t) = \{x_{1DE}(t); m_1 \cdot v_{1DE}(t); x_{2DE}(t); m_2 \cdot v_{2DE}(t)\},$$

которое при неограниченном возрастании времени будет стремиться к равномерному движению (6).

Динамические импульсы звеньев системы опишем с помощью системы интегральных

$$\begin{cases} m_1 \cdot v_{1DE}(t) = m_1 \cdot v_{1D} + \int_{t_1}^t \{F_{\partial\delta}(t) - F_c(t) - F_y(t)\} dt \\ m_2 \cdot v_{2DE}(t) = m_1 \cdot v_{2D} + \int_{t_1}^t F_y(t) dt \end{cases}, \quad (11)$$

где $F_y(t)$ – управляемая сила упругости связи.

Учитывая (10), начальные условия к системе (11), описывающей переходный процесс, принимают вид

$$x_1|_{t=D} = x_{1D}; x_2|_{t=D} = x_{2D}. \quad (12)$$

Система (11) с начальными условиями (12) позволяет сформулировать три различных задачи:

- при известных зависимостях от времени внешних сил и неизвестных зависимостях от времени двух координат $x_1(t)$ и $x_2(t)$ определить законы изменения координат;

- при неизвестной зависимости от времени одной из координат и одной из внешних сил и известном законе изменения второй координаты определить первую координату и неизвестную силу в зависимости от времени.

- при возможности управлять силой упругости и движущей силой и известных законах изменения двух координат найти зависимости от времени движущей силы и силы упругости, необходимые для заданного движения.

Выберем законы изменения во времени координат звеньев¹ и² из класса функций, определённых на интервале изменения времени $t \in [t_D, t_E]$, удовлетворяющих следующим условиям

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1|_{t=t_D} = x_{1D}; \\ \frac{dx_1}{dt}|_{t=t_D} = v_{1D}; \\ x_1|_{t=t_E} = x_{1B} + (t_E - t_D) \cdot v_p; \\ \frac{dx_1}{dt}|_{t=t_E} = v_p; \\ \frac{d^n x_1}{dt^n}|_{t=t_E} = 0, n > 1; \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2|_{t=t_D} = x_{2D}; \\ \frac{dx_2}{dt}|_{t=t_D} = v_{2D}; \\ x_2|_{t=t_E} = x_{1B} + (E - B) \cdot v_p - l; \\ \frac{dx_2}{dt}|_{t=t_E} = v_p; \\ \frac{d^n x_2}{dt^n}|_{t=t_E} = 0, n > 1; \end{array} \right. \quad (14)$$

Движущую силу и силу упругости будем считать функциями времени, подлежащими определению.

Системам (13) и (14) будут удовлетворять, в частности, законы движения вида

$$x_1(t) = v_p \cdot t + a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}} + a_2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}, t \in [t_D, t_E]; \quad (15)$$

$$x_2(t) = v_p \cdot t + b_0 + b_1 \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}} + b_2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}, t \in [t_D, t_E], \quad (16)$$

с коэффициентами, полученными приравниванием самих функций и их производных в точках t_D и t_E значениям, взятым из систем.

Запишем систему линейных алгебраических уравнений для определения a_0, a_1, a_2

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t_D}} + a_2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t_D)^2}} = x_{1D} - v_p \cdot t_D \\ -a_1 \cdot \frac{t_E \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t_D}}}{(t_E - t_D)^2} - a_2 \cdot \frac{t_E^2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t_D)^2}}}{(t_E - t_D)^3} = v_{1D} - v_p \\ a_0 = x_{1B} - v_p \cdot t_B \end{cases} \quad (17)$$

Решив систему (17), получим коэффициенты формулы (15):

$$\begin{cases} a_0 = x_{1B} - v_p \cdot t_B; \\ a_1 = \frac{e^{-\frac{t_E}{t_E - t_D}} \cdot \left(2 \cdot t_E^2 \cdot (x_{1D} - x_{1B} - v_p \cdot (t_D - t_B)) + (v_{1D} - v_p) \cdot (t_E - t_D)^3 \right)}{t_E \cdot (t_D + t_E)}; \\ a_2 = \frac{e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t_D)^2}} \cdot (t_D - t_E) \cdot \left(t_E \cdot (x_{1D} - x_{1B} + v_p \cdot t_B) + (v_{1D} - v_p) \cdot (t_E - t_D)^2 \right)}{t_E \cdot (t_D + t_E)} \end{cases} \quad (18)$$

Аналогично определим коэффициенты формулы (9):

$$\begin{cases} b_0 = x_{1B} - v_p \cdot t_B - l; \\ b_1 = \frac{e^{-\frac{t_E}{t_E - t_D}} \cdot \left(2 \cdot t_E^2 \cdot (x_{2D} - x_{1B} - v_p \cdot (t_D - t_B) + l) + (v_{2D} - v_p) \cdot (t_E - t_D)^3 \right)}{t_E \cdot (t_D + t_E)}; \\ b_2 = \frac{e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t_D)^2}} \cdot (t_D - t_E) \cdot \left(t_E \cdot (x_{2D} - x_{1B} + v_p \cdot t_B + l) + (v_{2D} - v_p) \cdot (t_E - t_D)^2 \right)}{t_E \cdot (t_D + t_E)} \end{cases} \quad (19)$$

Найдём зависимости функций управляющего воздействия от времени. Дифференцируя систему (11) по времени и учитывая (4), получим

$$F_y(t) = -F_{u2}(t) \quad (20)$$

$$F_{\partial \delta}(t) = -F_{u1}(t) + F_c(t) + F_y(t). \quad (21)$$

Для законов движения (15) – (16) эти формулы принимают следующий вид

$$\begin{aligned} F_y(t) = & \frac{m_2 \cdot b_1 \cdot t_E^2 \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}}}{(t_E - t)^4} - \frac{2 \cdot m_2 \cdot b_1 \cdot t_E \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}}}{(t_E - t)^3} + \\ & + \frac{4 \cdot m_2 \cdot b_2 \cdot t_E^4 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}}{(t_E - t)^6} - \frac{6 \cdot m_2 \cdot b_2 \cdot t_E^2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}}{(t_E - t)^4}; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} F_{\partial \delta}(t) = & \frac{(m_1 \cdot a_1 + m_2 \cdot b_1) \cdot t_E^2 \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}}}{(t_E - t)^4} - \frac{2 \cdot (m_1 \cdot a_1 + m_2 \cdot b_1) \cdot t_E \cdot e^{-\frac{t_E}{t_E - t}}}{(t_E - t)^3} + \\ & + \frac{4 \cdot (m_1 \cdot a_2 + m_2 \cdot b_2) \cdot t_E^4 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}}{(t_E - t)^6} - \frac{6 \cdot (m_1 \cdot a_2 + m_2 \cdot b_2) \cdot t_E^2 \cdot e^{-\frac{t_E^2}{(t_E - t)^2}}}{(t_E - t)^4} + F_c(t). \end{aligned} \quad (23)$$

Из формул (22) – (23) следует, что в момент времени $t = t_E$ выполняются соотношения

$$F_y(t) = 0, \quad (24)$$

$$F_{дв}(t) - Fc(t) = 0, \quad (25)$$

что обеспечивает плавный переход к равномерному движению по завершении переходного процесса.

Выводы.

В настоящей работе была рассмотрена задача подавления колебаний двухмассовой мехатронной системы в случае возможности одновременного управления её силовыми и упруго-массовыми параметрами. Решение было получено в обратном порядке: для фактического колебательного движения выбирался переходный процесс, для которого находились соответствующие законы изменения во времени силы упругости (22), действующей между звеньями и движущей силы (23), прикладываемой к ведущему звену.

Исходными данными для построения этих зависимостей является точка фазового пространства, в которой система находится в текущий момент времени. Преимуществами подхода являются точность регулирования и малая вычислительная затратность формул (22) и (23).

Таким образом, зная временную диаграмму движения системы при получении возмущающего воздействия, а также координаты и скорости звеньев системы, можно сформировать управляющее воздействие в виде законов изменения во времени силы упругости и движущей силы, с помощью чего в заданный момент времени t_E система продолжит то движение, которым обладала до возмущающего воздействия.

В случае еще одного возмущающего воздействия схема действий остаётся той же самой: для текущей точки временной диаграммы (аналог t_D) определяется точка временной диаграммы, в которой движение должно перейти к равномерному (аналог t_E), определяются координаты, которое имело бы каждое звено при равномерном движении с заданной скоростью из последней точки перед возмущающим воздействием. По этим данным выбираются законы движения каждого звена и соответствующие им законы изменения движущей и упругой силы во времени.

Объединение предложенного алгоритма, датчиков скоростей и перемещений и цифрового управляющего модуля позволит создать самоорганизующуюся систему с линейным перемещением. Применение такого подхода в производственной сфере и на транспорте принципиально способно привести к значительной экономии материалов, идущих на обеспечение жёсткости в случае, когда тот же результат может быть достигнут управляемым воздействием на гибкую систему.

Направлением дальнейших исследований нам представляется построение модели физической реализации управляемой силовой связи с учетом фактической структуры её элементов при многократном квазипериодическом нагружении[10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robinett R.D. Flexible robots dynamics and controls/ Robinett R. D., Feddema J., Eisler G.R., Dohrmann C., Parker, G.G. Wilson D.G., Stokes D.//Springer, 2002 – 352 p.
2. Шведова О.А. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования/О.А. Шведова, А.С. Шмарловский, А.В. Марков, Т.В. Тарасевич//Доклады БГУИР. - 2014. - № 1 (79). - С. 65 - 71.
3. Кузнецов Н. К. Управление движением двухмассовой колебательной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование :научн. ж-л / Иркут. гос. ун-т путей сообщ, 2004. № 2. – С. 130-137.
4. Завьялов В. М. Подавление упругих колебаний в трехмассовой механической системе / В. М. Завьялов, И. А. Куприянов // Вестник КузГТУ, 2006. № 6. - С. 75 -77.
5. Крутько П. Д. Управление движением упругих многомассовых систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1991. — № 4. — С. 90-96.
6. Qingle Hu. Variable structure control and active vibration suppression of flexible spacecraft during attitude maneuver/ Qingle Hu, Guangfu Ma// Aerospace Science and Technology, Vol. 9, Issue 4, June 2005, Pages 307-317
7. P.K.C.Wang. Vibrations in a moving flexible robot arm /P.K.C.Wang, Jin-Duo Wei//Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, Issue 1, July 1987, Pages 149-160
8. Еронько С.П. Исследование кинематики манипулятора для быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали / С. П. Еронько [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. - № 1. – С.44-49.
9. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, 1978— Т. 1. Колебания линейных систем/Под ред. В. В. Болотина. 1978. 352 с.

10. Неменко, А. В. Прикладные вопросы оценки технического состояния судовых механических систем : монография / А. В. Неменко, М. М. Никитин, Севастопольский государственный университет. - Москва : Вузовский учебник, Москва : ИНФРА-М, 2017. - 171 с.

Неменко Александра Васильевна

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая механика и машиноведение»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79788330519
E-mail: valesan@list.ru

Никитин Михаил Михайлович

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Инженер научно-исследовательской лаборатории
«Стохастическое моделирование систем»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +79788150316
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

VIBRATION SUPPRESSION DURING MASSIVE FLEXIBLE SYSTEM MOVEMENT

Abstract. *We consider the problem of transition and halting of two-mass system with flexible joint. show that in me.*

Keywords: *mass transition, elastic-mass system, algorithm, vibration suppression, vibration elimination, digital technologies.*

BIBLIOGRAPHY

1. Robinett R.D. Flexible robots dynamics and controls/ Robinett R. D., FeddemaJ., EislerG.R., DohrmannC., Parker, G.G. WilsonD.G., StokesD.//Springer, 2002 – 352 p.
2. SHvedova O.A. Algoritmy podavleniya kolebanij gruzov pod"emno-transportnyh mekhanizmov s ispolzovaniem nechetkoj logiki funkcionirovaniya/O.A. SHvedova, A.S. SHmarlovskij, A.V. Markov, T.V. Tarasevich//Doklady BGUIR. - 2014. - № 1 (79). - S. 65 - 71.
3. Kuznecov N. K. Upravlenie dvizheniem dvumassovoj kolebatelnoj sistemy // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie :nauchn. zh-l / Irkut. gos. un-t putej soobshch, 2004. № 2. – S. 130-137.
4. Zavyalov V. M. Podavlenie uprugih kolebanij v trekhmassovoj mekhanicheskoj sisteme / V. M. Zavyalov, I. A. Kupriyanov // Vestnik KuzGTU, 2006. № 6. - S. 75 -77.
5. Krutko P. D. Upravlenie dvizheniem uprugih mnogomassovyh sistem // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. — 1991. — № 4. — S. 90-96.
6. QingleHu. Variable structure control and active vibration suppression of flexible spacecraft during attitude maneuver/ Qingle Hu, GuangfuMa// Aerospace Science and Technology, Vol. 9, Issue 4, June 2005, Pages 307-317
7. P.K.C.Wang. Vibrations in a moving flexible robot arm /P.K.C.Wang, Jin-Duo Wei//Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, Issue1, July1987, Pages149-160
8. Eronko S.P. Issledovanie kinematiki manipulyatora dlya bystroj zameny pogruzhnyh stakanov pri nepreryvnoj razlivke stali / S. P. Eronko [i dr.] // Metallurgicheskie processy i oborudovanie. – 2006. - № 1. – S.44-49.
9. Vibracii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t. / Red. sovet:V. N.CHelomej (pred.). — M.: Mashinostroenie, 1978— T. 1. Kolebaniya linejnyh sistem/Pod red. V. V. Bolotina. 1978. 352 s.
10. Nemenko, A. V. Prikladnye voprosy ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya sudovyh mekhanicheskikh sistem : monografiya / A. V. Nemenko, M. M. Nikitin, Sevastopolskij gosudarstvennyj universitet. - Moskva : Vuzovskij uchebnik, Moskva : INFRA-M, 2017. - 171 s.

NemenkoAleksandraVasiljevna

Federal State Autonomous Educational Foundation
«Sevastopol State University», Sevastopol.
Ph.D., assistant professor of chair «TechnicalMechanics
and Machine Theory »
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
Ph.:+79788330519
E-mail:valesan@list.ru

Nikitin Mikhail Mikhailovich

Federal State Autonomous Educational Foundation
«Sevastopol State University», Sevastopol.
Engineer of the laboratory “Stochastic Modeling of
Systems”
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
Ph.:+79788150316
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СВОБОДНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В КВАДРАТНУЮ МАТРИЦУ

Аннотация. Многослойные изделия ячеистой формы применяются для корпусов топливных емкостей, а также для внешних корпусов летательных аппаратов. Эти конструкции характеризуются небольшим весом и высокой прочностью. Перспективными выглядят технологии изготовления крупногабаритных изделий методом монотонного формообразования инертными газами. В статье представлен подход к созданию модели, описывающей энергосиловые параметры при свободном формообразовании изделий из титановых сплавов в матрицах квадратной формы при кратковременной ползучести. Приведены результаты математического моделирования исследуемого процесса в виде неравенств, позволяющих оценить давление и критические режимы. По ним установлено влияние времени процесса на изменение относительной толщины заготовки в различных местах ее площади ее высоты и максимальной повреждаемости.

Ключевые слова: пневмоформовка, напряжения, деформации, квадратная матрица, высота, толщина.

Введение.

Конструкции из одного или нескольких листовых слоев ячеистой формы применяются для оболочек емкостей топливных баков, а также для внешних корпусов деталей, крыльев, обтекателей и т.д. Одновременно при повышенной прочности эти конструкции характеризуются небольшим весом и высокой способностью к сопротивлению различным нагрузкам при нагружении. Существующие технологии получения конструкций ячеистой формы представляют собой в основном механическую и электрохимическую обработку [1, 2]. Перспективными в плане изготовления этих конструкций выглядят технологии горячего медленного деформирования избыточным давлением газа. В статье представлен подход к созданию модели, описывающей энергосиловые параметры при свободном формообразовании изделий из титановых сплавов в матрицах квадратной формы при кратковременной ползучести. Для чего рассмотрим формоизменение листа толщиной h_0 в матрице квадратной формы со сторонами размером $2a$ с реализацией режима кратковременной ползучести под давлением p , которое изменяется от времени t в следующем виде: $p = p_0 + a_p t^{n_p}$, где a_p и n_p - параметры закона нагружения. Материал проявляет анизотропные свойства. Заготовку под формообразование получали из листа так, что любая из сторон является параллельной оси y (перпендикулярно направлению прокатки x) [1-10]. Сама заготовка фиксировалась по наружному контуру (рисунок).

При моделировании предполагаем, что размеры заготовки таковы, что реализуется плоское напряженное состояние ($\sigma_z = 0$). Изделие при формоизменении приобретает профиль в виде сферы. При деформировании считаем, что вдоль осей симметрии профиль представляет собой окружность.

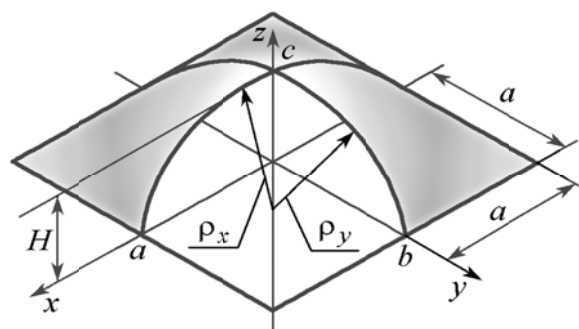


Рисунок 1 - Схема к моделированию формоизменения квадратной заготовки

Теперь на необходимо определить значение накопленной в ходе формообразования повреждаемости ω_{ec}^c в полюсе оболочки. Для чего требуется осуществить подстановку величины σ_e из первого уравнения состояния во второе. После чего получим

$$\dot{\omega}_{ec}^c = \frac{k}{B} \xi_e^c; \quad k = B / \varepsilon_{enp}^c. \quad (1)$$

Следующим этапом необходимо определить нагружение иделия, когда в его полюсе $\xi_{ec}^c = \xi_{ec1}^c = const$. В этом случае проинтегрировав уравнения (1) при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^c = 0$, получим

$$\omega_{ec}^c = \frac{k}{B} \xi_{ec1}^c t = \frac{k \varepsilon_{ec}^c}{B}. \quad (2)$$

Критические деформации в заготовке формируются при $\omega_{ec}^c = 1$, откуда следует, что

$$\varepsilon_{ecnp}^c = \frac{B}{k}. \quad (3)$$

Давление p при котором создаются условия для успешного формоизменения, найдем по соотношению

$$p = \frac{2\sigma_{e0} (1 - \omega_{ec}^c)^{m/n} H h_0 a^2 (1 + \chi_1)}{D_1 (H^2 + a^2)^3} \left(\frac{\xi_{ec1}^c}{B} \right)^{1/n}. \quad (4)$$

Зависимость $\omega_{ec}^c = \omega_e^c(t)$ определяется соотношением (1), а функция $H = H(t)$ может быть найдена из выражения

$$\varepsilon_{ec}^c = \int_0^t \xi_{ec}^c dt = \xi_{ec1}^c t, \quad (5)$$

а также следующим образом:

$$\varepsilon_{ec}^c = \int_0^t C_1 \xi_{yc}^c dt = \int_0^H C_1 \frac{2H dH}{H^2 + a^2}, \quad (6)$$

т.е.

$$t = \frac{C_1}{\xi_{ec1}^c} \ln \frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим нагружение листовой заготовки, когда $p = const$.

Подставив в уравнение (1) выражения $\xi_{ec}^c = C_1 \xi_{yc}^c = C_1 \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}$ и соотношения

$$\xi_{xc}^c = \xi_{yc}^c = \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}; \quad \xi_{zc}^c = \frac{\dot{h}}{h}, \text{ получим с учетом (3)}$$

$$\dot{\omega}_{ec}^c = \frac{k}{B} C_1 \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2} = \frac{2C_1 H \dot{H}}{(H^2 + a^2) \varepsilon_{ecnp}^c}. \quad (8)$$

Проинтегрировав это уравнение при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^c = 0$, имеем

$$\omega_{ec}^c = \frac{1}{\xi_{ec1}^c} \ln \frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (9)$$

Предельно возможную высоту в полюсе изделия H_* найдем из уравнения (9) при $\omega_{ec}^c = 1$.

Рассмотрим напряженное и деформированное состояния в точке $x = a$, $y = 0$.

Величины σ_{ea} и ξ_{ea}^c для этой точки определяются из соотношений $\sigma_{ea} = \bar{D}_{1a} \sigma_{xa}$, и $\xi_{ea}^c = \bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c$. Повреждаемость находится из уравнения

$$\dot{\omega}_{ea}^c = \frac{\xi_{ea}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}}. \quad (10)$$

В случае нагружения листовой заготовки, когда $\xi_{ea}^c = \xi_{ea1}^c = \text{const}$,

$$\omega_{ea}^c = \frac{\xi_{ea1}^c t}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}}. \quad (11)$$

Критические значения деформаций в заготовке достигаются при $\omega_{ea}^c = 1$.

Давление при котором реализуются условия для окончательного формоизменения получим при подстановке в первое уравнение состояния выражений σ_{ea} и $\xi_{ea}^c = \xi_{ea1}^c$. Получим

$$p(t) = \frac{2\sigma_{e0}(1 - \omega_{ea}^c)^{m/n} h_0 a^2 H}{(H^2 + a^2)^2} \left(\frac{\xi_{ea1}^c}{B} \right)^{1/n}. \quad (12)$$

Функциональная связь $H = H(t)$ находится из условия

$$\varepsilon_{ea}^c = \int \xi_{ea1}^c dt = \xi_{ea1}^c t = \int \bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c dt. \quad (13)$$

Следовательно,

$$t = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^c} \int_0^H \frac{2H dH}{H^2 + a^2} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^c} \ln \frac{H^2 + a^2}{a^2}. \quad (14)$$

Если нагружение осуществляется при условии $p = \text{const}$, то накопление повреждаемости описывается уравнением

$$\dot{\omega}_{ea}^c = \frac{\xi_{ea}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} = \frac{\bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} \frac{2H\dot{H}}{(H^2 + a^2)}. \quad (15)$$

Интегрирование этого уравнения при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ea}^c = 0$ приводит к соотношению

$$\omega_{ea}^c = \frac{\bar{C}_{1a}}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} \ln \frac{H^2 + a^2}{a^2}. \quad (16)$$

Величина H_* вычисляется из условия $\omega_{ea}^c = 1$.

Безразмерное время разрушения $\bar{t}_*$ определяется выражением

$$\bar{t}_* = \int_0^{H_*} \frac{(1 - \omega_{ea}^c)^m H^{n+1} a^{2n} h_0^n dH}{(H^2 + a^2)^{2n+1}}, \quad (17)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^n \bar{D}_{1a}^n B}{\bar{C}_{1a} \sigma_{ea}^n 2^{n+1}} t_*. \quad (18)$$

Условия деформирования в точке $x=0$, $y=a$ аналогичны этим условиям в точке $y=0$, $x=a$.

Полученное решение для определения энергосиловых параметров при изотермическом формообразовании плоской заготовки из материала, характеризующегося анизотропией можно считать справедливым и материала без анизотропии. Для чего читаем, что $R_x = R_y = 1$.

Используя выведенные уравнения оценим возможности формообразования титанового сплава, подчиняющегося кинетической теории ползучести и повреждаемости. Оценка полученных зависимостей (рисунки 2 и 3) установила, что рост параметров нагружения a_p и n_p может приводить к заметному росту величины высоты формуемой заготовки $\bar{H}$ и снижению значения толщины оболочки в верхней части изделия $\bar{h}_c$ со временем деформирования t . Но критические высота $\bar{H}_*$ и толщина $\bar{h}_{c*}$ от этих значений не меняются.

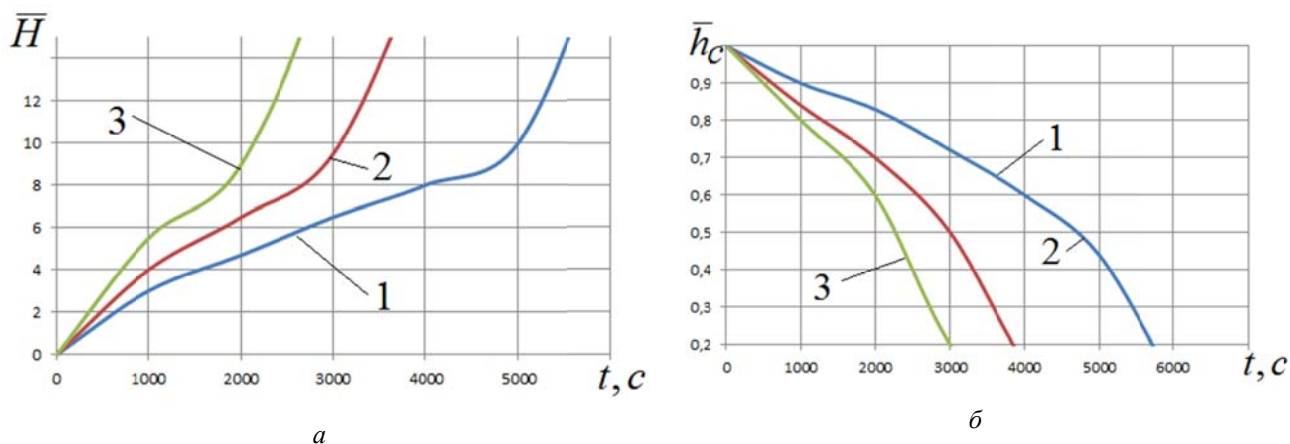


Рисунок 2 - К оценке влияния времени формообразования на $\bar{H}$ (а) и $\bar{h}_c$ (б)

для титанового сплава ВТ6С ($T = 930^\circ \text{C}$; $n_p = 0,4$; $a = 15 \text{ мм}$):

1 - $a_p = 0,04 \text{ МПа/с}^{n_p}$; 2 - $a_p = 0,06 \text{ МПа/с}^{n_p}$; 3 - $a_p = 0,08 \text{ МПа/с}^{n_p}$

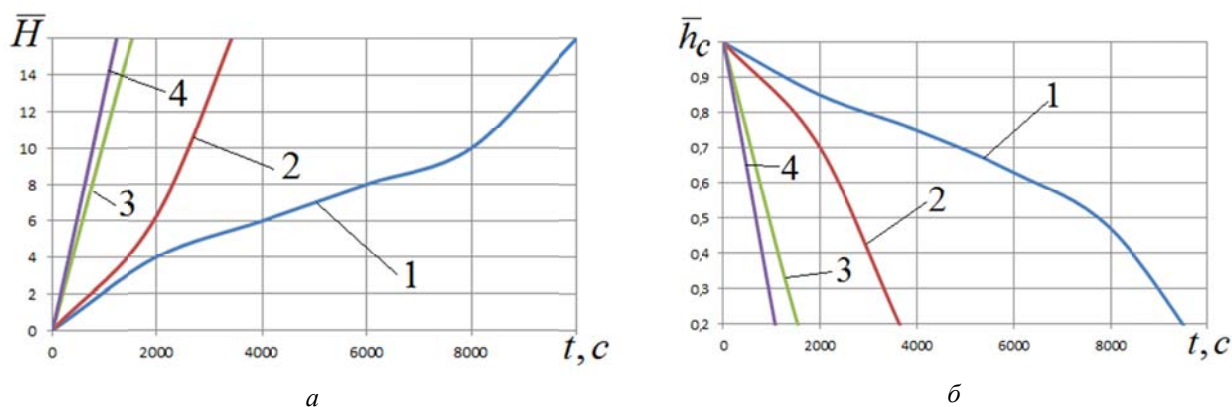


Рисунок 3 - К оценке влияния времени формообразования на $\bar{H}$ (а) и $\bar{h}_c$ (б)

для титанового сплава ВТ6С ($T = 930^\circ \text{C}$; $a_p = 0,06 \text{ МПа/с}^{n_p}$; $a = 15 \text{ мм}$):

$$1 - n_p = 0,3 ; 2 - n_p = 0,4 ; 3 - n_p = 0,5 ; 4 - n_p = 0,6$$

На рисунке 4 показана зависимость, позволяющая выявить влияние течения времени формообразования на повреждаемость материала. Из нее видно, что критическое значение накопленной повреждаемости ω_e наблюдается в полюсе изделия и с ростом времени формообразования ω_e ее значение растет (рисунок 4).

Выводы. Получены выражения, позволяющие получить подход к моделированию формообразования изделия квадратно формы при реализации условий кратковременной ползучести. Полученные уравнения способствовали осуществлению теоретической оценки исследуемой операции. Были построены зависимости устанавливающие влияние закона нагружения, геометрии изделия, механических свойств заготовки на напряжения, деформации, давление операции и критические режимы при формообразовании изделий квадратной формы с реализацией кратковременной ползучести. Установлены возможности бездефектного формообразования титанового сплава, подчиняющегося кинетической теории ползучести и повреждаемости. Выявлено влияние течения времени формообразования на повреждаемость материала.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710016 и 16-08-00020 и гранта администрации Тульской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин С.Н. Пневмоформовка ячеистых панелей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С 51-61.
2. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.
3. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
4. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 311 с.
5. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
6. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. М: Машиностроение, Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.
7. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
8. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.
9. Поздеев А.А., Тарновский В.И., Еремеев В.И. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 192 с.
10. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

Ларин Сергей Николаевич
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Механика пластического формоизменения»
300012, ГСП, пр. Ленина, д. 92, ТулГУ,
т. 8(4872) 73 44 91.

Платонов Валерий Иванович
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Механика пластического формоизменения»
300012, ГСП, пр. Ленина, д. 92, ТулГУ,
т. 8(4872) 73 44 91.

S.N. LARIN, V.I. PLATONOV

ANALYSIS OF CHANGING THE GEOMETRY OF PRODUCTS IN THE ISOTHERMAL FREE DEFORMATION OF TITANIUM ALLOYS IN A SQUARE MATRIX

Abstract. *Multi-layer cellular products are used for fuel tank casings, as well as for external hulls of aircraft. These designs are characterized by low weight and high strength. The technology of manufacturing large-sized products by the method of monotonous shaping with inert gases looks promising. The paper presents an approach to the creation of a model describing the energy-force parameters for the free shaping of articles made of titanium alloys in square-shaped matrices with short-term creep. The results of mathematical modeling of the process under study in the form of inequalities that allow estimating pressure and critical regimes are presented. They determined the influence of the time of the process on the change in the relative thickness of the workpiece in various places in its area of height and maximum damage.*

Keywords: *pneumofforming, stress, deformation, square matrix, height, thickness.*

BIBLIOGRAPHY

1. Larin S.N. Pnevmoformovka yacheistyh panelej iz anizotropnogo materiala // Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskie nauki. Tula: Izd-vo TulGU, 2010. Vyp. 3. S 51-61.
2. YAKovlev S.S., Larin S.N., Tregubov V.I. Izotermicheskaya pnevmoformovka ehlementov yacheistyh mnogoslojnyh listovyh konstrukcij iz anizotropnyh vysokoprochnnyh materialov v rezhime polzuchesti / pod red. S.S. YAKovleva. Tula: Izd-vo TulGU, 2011. 173 s.
3. Malinin N.N. Polzuchest v obrabotke metallov. M.: Mashinostroenie, 1986. 216 s.
4. Ershov V.I., Glazkov V.I., Kashirin M.F. Sovershenstvovanie formoizmenyayushchih operacij listovoj shtampovki. M.: Mashinostroenie, 1990. 311 s.
5. Izotermicheskaya pnevmoformovka anizotropnyh vysokoprochnnyh listovyh materialov / S.N. Larin [i dr.] / pod red. S.S. YAKovleva. M.: Mashinostroenie, 2009. 352 s.
6. Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnnyh anizotropnyh metallov / S.P. YAKovlev, V.N. CHudin, S.S. YAKovlev, YA.A. Sobolev. M.: Mashinostroenie, Izd-vo TulGU, 2004. 427 s.
7. Izotermicheskoe deformirovanie metallov / S.Z. Figlin, V.V. Bojcov, YU.G. Kalpin, YU.I. Kaplin. M.: Mashinostroenie, 1978. 239 s.
8. Ogorodnikov V.A. Ocenka deformiruемости metallov pri obrabotke davleniem. Kiev: Vishcha shkola, 1983. 175 s.
9. Pozdeev A.A., Tarnovskij V.I., Eremeev V.I. Primenenie teorii polzuchesti pri obrabotke metallov davleniem. M.: Metallurgiya, 1973. 192 s.
10. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgiya, 1973. 224 s.

Larin Sergey Nikolaevich

FGBOU VO "Tula State University"

Ph.D., Assoc., Professor of the Department of Mechanics of Plastic Forming

300012, GSP, 92 Lenina Ave., Tula State University,
tel. 4872) 73 44 91

Platonov Valery Ivanovich

FGBOU VO "Tula State University"

Ph.D., Assoc., Associate Professor of the Department of Mechanics of Plastic Forming

300012, GSP, 92 Lenina Ave., Tula State University,
tel. 8 4872) 73 44 91

ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 658.512

В.Б. БОГУЦКИЙ, Л.Б. ШРОН

СИНТЕЗ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ПОТОКА ОТКАЗОВ РЕМОНТИРУЕМЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Рост парка металлообрабатывающего оборудования выдвигает повышение требований к уровню развития и организации ремонтно-сервисного обслуживания. Для обеспечения высокого качества ремонта металлообрабатывающего оборудования необходимо сформировать структуру автоматизированных механообрабатывающих участков на ремонтных предприятиях. Синтез структур таких участков необходимо проводить с учетом параметров потоков отказов отдельных узлов и деталей ремонтируемого оборудования. Изучение параметров потока отказов функционирования систем станка по результатам, полученным в реальных условиях эксплуатации и ремонта, позволило выявить наиболее уязвимые, с точки зрения надежности, системы. Механизмы таких подсистем в первую очередь нуждаются в модернизации и усовершенствованиях, направленных на повышение их эксплуатационных свойств, позволяющих увеличить надежность, как отдельных узлов, так и станка в целом. Показатели вероятности отказа деталей класса «тела вращения» дают основание сделать вывод о необходимости синтеза гибких механообрабатывающих модулей для их изготовления в процессе ремонта с целью замены вышедших из строя в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: металлообрабатывающее оборудование, качество ремонта, подсистема, надежность, уравнения финальных вероятностей, привод подачи, технологически однородные группы деталей.

Введение

Рост станочного парка выдвигает повышение требований к уровню развития и организации ремонтно-сервисного обслуживания, как к самостоятельной сфере деловой активности. Существующий станочный парк предприятий, специализирующихся на ремонте металлообрабатывающего оборудования, не позволяет оперативно реагировать на решение задач, связанных с изготовлением (восстановлением) деталей в процессе ремонта, так как содержит зачастую малопроизводительное и морально устаревшее оборудование [1–5 и др.]. Решением этой проблемы является создание ремонтного производства на основе автоматизированных участков по групповой механической обработке деталей. Для определения рациональных структур таких участков необходима разработка методики формирования рациональных подсистем.

Для обеспечения высокого качества ремонта металлообрабатывающего оборудования необходимо сформировать структуру автоматизированных механообрабатывающих участков на ремонтных предприятиях. Последовательность решения задачи синтеза автоматизированных участков для условий ремонтного производства показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Укрупненная структурная схема последовательности решения задач синтеза автоматизированных участков ремонтного производства

Основная часть.

Синтез структур таких участков необходимо проводить с учетом параметров потоков отказов отдельных узлов и деталей. В настоящее время методы определения рационального состава автоматизированных участков для ремонтного производства отсутствуют. Это обозначает приоритетность решения задачи теоретического обоснования и математического определения оптимальных соотношений надежности и переналаживаемости автоматизированного оборудования ремонтного производства.

Анализ литературных источников [6–11] показывает, что для оценки эффективности принятия решения выбора рационального варианта участка ремонтного производства требуется на основе системного анализа рассматривать модели, описывающие технологические процессы ремонта и восстановления на различных этапах анализа и синтеза.

Участок автоматизированного производства, состоящий из нескольких гибких производственных модулей, следует рассматривать как техническую динамическую систему обладающую следующими признаками [9–12]:

–каждый модуль включает в себя несколько взаимодействующих между собой подсистем;

–состояние каждой из подсистем и модуля в целом изменяется во времени;

–текущее состояние и история развития является характеристикой гибкого модуля и каждой из подсистем.

Для определения технологически однородных групп наименее надежных деталей станков необходимо решить ряд задач (рисунок 2).

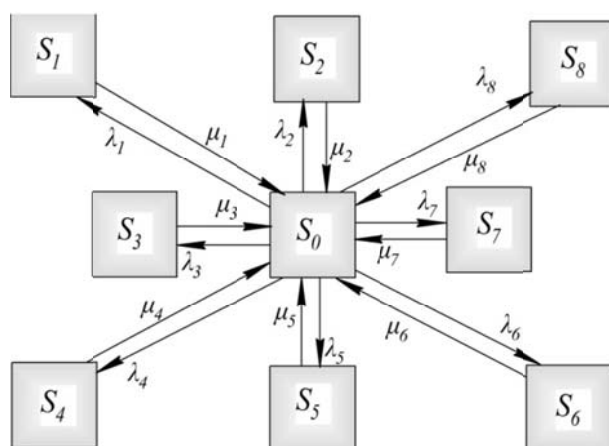


Рисунок 2 – Граф состояний станка:

S_0 – нормальная работа станка; S_1 – ремонт подсистемы главного привода; S_2 – ремонт подсистемы подачи СОТС; S_3 – ремонт подсистемы ЧПУ; S_4 – ремонт подсистемы гидрооборудования станка; S_5 – ремонт подсистемы электрооборудования станка; S_6 – ремонт подсистемы ЧПУ; S_7 – ремонт подсистемы станины (направляющих); S_8 – ремонт подсистемы привода подач

Представленный граф состояний описывается системой уравнений финальных вероятностей (1), $\lambda_1 \dots \lambda_8$ – интенсивности потоков отказов соответствующих подсистем; $\mu_1 \dots \mu_8$ – интенсивности потоков восстановления соответствующих подсистем [7, 13].

Решение данной системы уравнений можно произвести с помощью условия нормировки:

$$P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1 \quad (1)$$

Среднее время между двумя отказами $\bar{T}_i$ соответствующих подсистем оборудования, а также среднее время ремонта (замены, восстановления) $\bar{T}_{vi}$ узлов (деталей) вышедшей из строя системы подсчитывается на основе данных службы механика цеха (предприятия), где эксплуатируется конкретный станок. Число дефектов соотносится с общим числом станков из общей возрастной группы (до десяти лет эксплуатации).

В качестве одной из составляющих интенсивности потока отказов удобно принимать наработку $\bar{T}_i$ станка до отказа соответствующей системы.

Полученные величины интенсивности потоков отказов $\lambda_i = 1/\bar{T}_i$ и потоков восстановления $\mu_i = 1/\bar{T}_{ei}$ каждой из систем подставляются в уравнения финальных вероятностей и подсчитывается вероятность безотказной работы P_0 оборудования, а также вероятности соответствующих отказов $P_1 \dots P_8$, т.е. нахождения оборудования в нерабочем состоянии по причине отказа одной из соответствующих систем [13].

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = \left(1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \dots + \lambda_8/\mu_8 \right)^{-1} \\ P_1 = P_0 \lambda_1/\mu_1; \\ P_2 = P_0 \lambda_2/\mu_2; \\ P_3 = P_0 \lambda_3/\mu_3; \\ P_4 = P_0 \lambda_4/\mu_4; \\ P_5 = P_0 \lambda_5/\mu_5; \\ P_6 = P_0 \lambda_6/\mu_6; \\ P_7 = P_0 \lambda_7/\mu_7; \\ P_8 = P_0 \lambda_8/\mu_8. \end{array} \right. \quad (2)$$

В таблице 1 приведены усредненные данные ряда предприятий России, выполняющих ремонт металлообрабатывающего оборудования.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета надежности подсистем металлообрабатывающего оборудования

Подсистема	Наработка на отказ $\bar{T}_i$, ч	Интенсивность отказа λ_i , ч ⁻¹	Среднее время восст. $\bar{T}_{ei}$, ч	Интенсивность восст. μ_i , ч ⁻¹
Главный привод	4285	$2,3 \cdot 10^{-4}$	64,92	0,0152
Система подачи СОТС	3429	$2,9 \cdot 10^{-4}$	38,72	0,0257
Система ЧПУ	3571	$2,8 \cdot 10^{-4}$	3,1	0,325
Гидрооборудование	2857	$3,5 \cdot 10^{-4}$	2,21	0,454
Электрооборудование	2143	$4,6 \cdot 10^{-4}$	8,3	0,124
Устройство автоматической смены инструмента	2457	$2,1 \cdot 10^{-4}$	5,2	0,191
Станина (направляющие)	5143	$1,1 \cdot 10^{-4}$	33,2	0,336
Привод подач	3586	$2,3 \cdot 10^{-4}$	18,78	0,0534

Таблица 2 – Результаты расчетов надежности систем металлообрабатывающего оборудования

Показатель надежности	Обозначение	Величина	Показатель надежности	Обозначение	Величина
Станок	P_0	0,962000	Электрооборудование	P_5	0,003780
Главный привод	P_1	0,015200	Устройства автоматической смены инструмента	P_6	0,002100
Привод подач	P_2	0,012200	Станина (направляющие)	P_7	0,000562
Система ЧПУ	P_3	0,000830	Система подачи СОТС	P_8	0,003290
Гидрооборудование	P_4	0,000757			

Результаты расчетов надежности отдельных систем металлообрабатывающего оборудования показаны в таблице 2. Графическая интерпретация данных таблицы 2 показана на рисунке 3.

После определения наименее надежных узлов и узлов, требующих повышенного внимания, в нашем случае – привода подачи, необходимо приступить к разработке рационального технологического процесса ремонта данного узла.

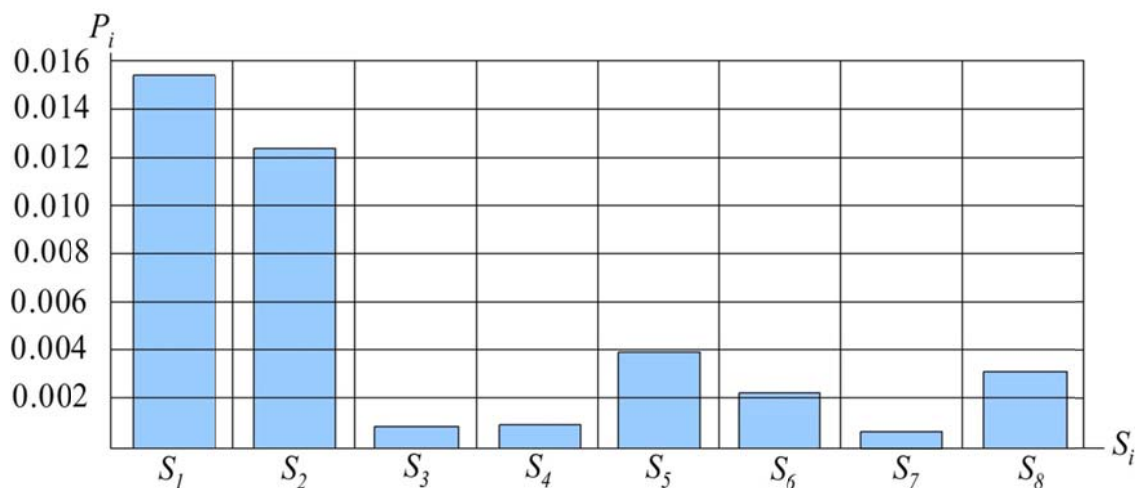


Рисунок 3 – Диаграмма вероятности отказов систем металлообрабатывающего оборудования

Третий этап характеризуется выделением технологически однородных групп наименее надежных деталей. При этом применяется математический аппарат цепей Маркова с построением размеченного графа состояний станка и его систем с учетом потока отказов и восстановления [14, 15]. Так, для привода подачи станка классификация деталей, подлежащих ремонту, показана на рисунке 4.

На четвертом этапе осуществляется разработка типовых технологических процессов изготовления (либо восстановления) деталей, предназначенных для замены отказавших.

На пятом этапе производится анализ возможных вариантов применения автоматизированного оборудования для групп изготавливаемых (восстанавливаемых) деталей, на шестом – анализ возможных загрузочных устройств и приспособлений. На этих этапах целесообразно использовать неполный перебор вариантов проектируемой системы, основанный как на использовании ЭВМ, так и на применении человеко-машинных или эвристических методов. С математической точки зрения неполный перебор с ЭВМ тождествен поиску локального или глобального экстремума функций многих переменных и дает существенный выигрыш при строгой формализации задач синтеза сложных систем.

Седьмой этап сопровождается синтезом структур компоновок автоматизированных участков для наиболее многочисленных групп деталей. На восьмом этапе осуществляется оценка вариантов структур участков с учетом стохастических процессов (отказов и возможных переналадок), на девятом – выбор рационального структурного варианта по критерию эффективности.

Проанализировав вероятности отказов систем станка остановим внимание на надежности системы привода подачи, т. к. надежность этой системы в значительной степени сказывается на стабильности точности обработки деталей.

Изучение параметров потока отказов функционирования систем станка по результатам полученным в реальных условиях эксплуатации и ремонта, выявило наиболее уязвимые системы с точки зрения надежности. К их числу следует отнести привод подачи станка. Приведенный граф состояний (рисунок 5) позволяет рассмотреть надежность с учетом функционирования его подсистем и механизмов.

Привод может находиться в исправном состоянии S_0 , а также в состояниях, вызванных отказами ее подсистем: S_1 – ремонт или замена шестерен (зубчатых колес); S_2 – ремонт или замена валов; S_3 – ремонт или замена муфт; S_4 – ремонт механизма переключения подачи; S_5 – замена уплотнительных устройств; S_6 – ремонт или замена шарико-винтовых

передач; S_7 – замена подшипников; S_8 – ремонт двигателя подачи (гидро-, пневмо- или электродвигателя).

Результаты расчетов вероятностей отказов подсистем и механизмов привода подач показаны на рисунке 6.

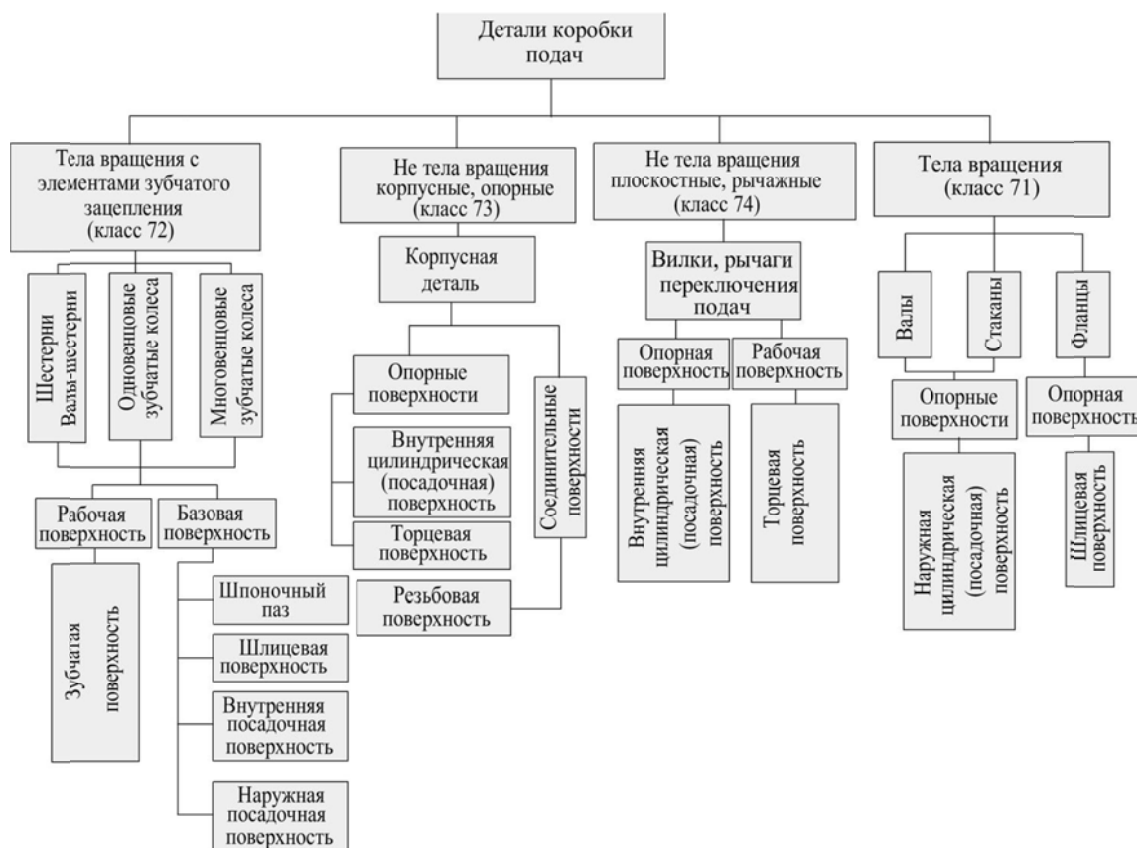


Рисунок 4 – Классификация деталей привода подачи станка

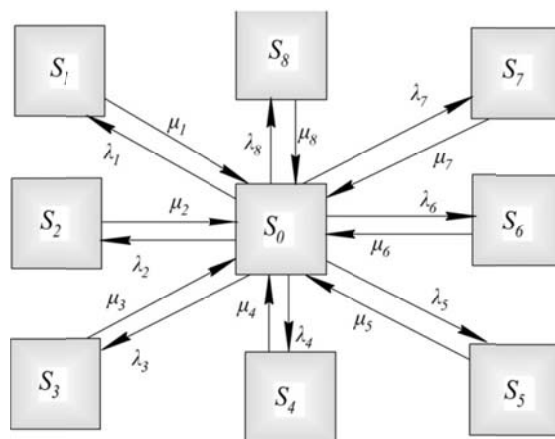


Рисунок 5 – Граф состояний привода подачи

Заключение.

Проведенные исследования позволили выявить наименее надежные подсистемы привода подачи ($P_1=0,0164$, $P_2=0,0124$, $P_3=0,0057$, $P_4=0,00083$, $P_5=0,0045$, $P_6=0,0016$, $P_7=0,0011$, $P_8=0,0056$). Механизмы указанных подсистем в первую очередь нуждаются в модернизации и усовершенствованиях, направленных на повышение их эксплуатационных свойств, позволяющих увеличить надежность, как привода подачи, так и станка в целом.

Вероятность отказа тел вращения $P_2=0,0124$ дает основание сделать вывод о необходимости их изготовления в процессе ремонта с целью замены вышедших из строя в процессе эксплуатации.

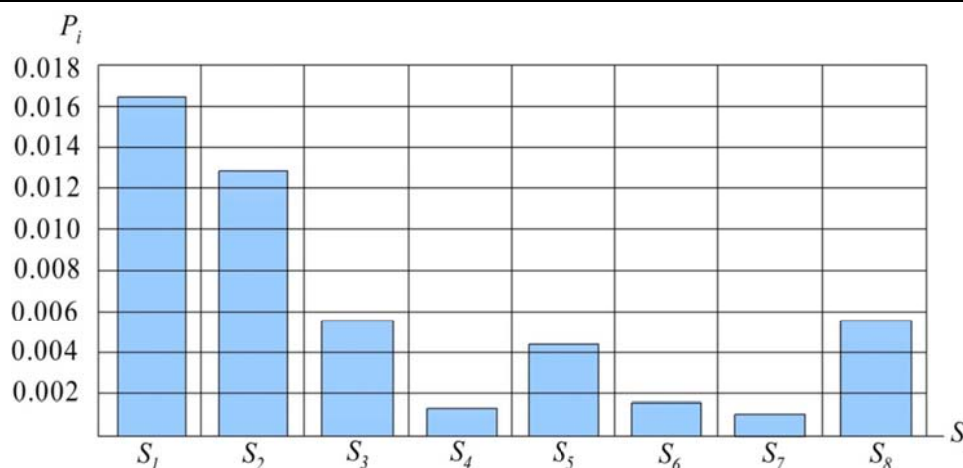


Рисунок 6 – Диаграмма вероятностей отказов механизмов и подсистем привода подачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор рынка по ремонту оборудования. URL: http://www.russerviceunion.ru/ru/service/market_overview.html
2. Модернизация станка и капитальный ремонт станка: общий обзор. URL: <http://remstan.ru/modernizaciya-stanka-obzor/>.
3. Обзор рынка станкостроения URL: <https://www.openbusiness.ru/biz/business/obzor-rynka-stankostroeniya/>
4. Информация о результатах анализа состояния и развития отрасли станкостроения в государствах-членах ТС и ЕЭП URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/SiteAssets/pdf
5. Станкостроение в России: состояние, тенденции, перспективы. URL: https://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry_348.html.
6. Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability / Department of energy. URL: https://build4scale.llnl.gov/docs/modules/Module_3C.pdf.
7. Богуцкий, В.Б., Шрон, Л.Б., Гордеева, Э.С. Синтез гибких механообрабатывающих модулей для условий ремонтного производства // Theoretical & Applied Science. – 2017. – № 11 (55). – С. 101–110.
8. Seongwoo Woo. Reliability Design of Mechanical Systems. A Guide for Mechanical and Civil Engineers DOI 10.1007/978-3-319-50829-0_1 / Woo Seongwoo. – Springer International Publishing AG, 2017. – 309.
9. Kasser, J. Writing Requirements for Flexible Systems // IN-COSE-UK Spring Symposium, – 2001. P.1–8.
10. Raluca Nicolae. Anisor Nedelcu. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system // Review of the Air Force Academy. – 2015. – № 1 (28). – P. 155–158. (2015).
11. Dodla Srikanth, M. Kulkarni. Quality, Reliability and Maintenance (Q, R & M) Issues in Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 110–116. – P. 1442–1446.
12. Tiberiu S. Letia, Adina Astilean, Mihai Hulea. Analysis and Synthesis of the Flexible Manufacturing System Potential Behaviors // Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania, May 23–25, 2012. – Bucharest, 2012. – P. 248–253.
13. Богуцкий, В.Б., Шрон, Л.Б. Оценка надежности синтезированного варианта модуля для механической обработки деталей по отказам функционирования // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Научный журнал. № 1 (59). – Симферополь: РИО КИПУ, – 2018. – С. 170–176.
14. Денисенко, Т.И. Использование марковских цепей при решении различных прикладных задач // Фундаментальные исследования. – 2009. – No 1. – С. 27–28.
15. Кельберт, М.Я., Сухов, Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. – М.: МЦНМО, 2010. – 295 с.

Богуцкий Владимир Борисович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
Технология машиностроения
229053, г. Севастополь, ул. Университетская 33
Тел. +7(978)–76–72–873
E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Шрон Леонид Борисович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
Технология машиностроения
229053, г. Севастополь, ул. Университетская 33
Тел. +7(978)–74–47–546
E-mail: shronlb@mail.ru

SYNTHESIS OF MACHINING MODULES FOR REPAIR MANUFACTURING WITH THE ACCOUNT THE FAILURE FLOW OF SEPARATE UNITS AND PARTS WHICH ARE PROVIDED FOR REPAIR

Abstract. *The growth of the park of metalworking equipment puts forward increasing requirements for the level of development and organization of repair and maintenance services. To ensure the high quality of metalworking equipment repair, it is necessary to form the structure of automated machining sections in repair enterprises. Synthesis of the structures of such areas should be carried out taking into account the parameters of failure flows of individual units and parts of the equipment being repaired. The study of the failure flow parameters of the machine system operation based on the results obtained under real operating and repair conditions made it possible to identify the most vulnerable, from the point of view of reliability, systems. The mechanisms of such subsystems in the first place need modernization and improvements aimed at increasing their operational properties, allowing to increase the reliability of both individual units and the machine as a whole. The indicators of the probability of failure of details of the "shafts" class give grounds to conclude that it is necessary to synthesize flexible machining modules for their manufacture in the process of repair in order to replace failed during exploitation.*

Keywords: *metalworking equipment, repair quality, subsystem, reliability, equations of the final probability, feed drive, technologically homogeneous groups of parts.*

BIBLIOGRAPHY

1. Obzor rynka po remontu oborudovaniya. URL: <http://www.russerviceunion.ru/ru/service/market/overview.html>
2. Modernizatsiya stanka i kapitalnyy remont stanka: obshchiy obzor. URL: <http://remstan.ru/modernizatsiya-stanka-obzor/>
3. Obzor rynka stankostroyeniya URL: <https://www.openbusiness.ru/biz/business/obzor-rynka-stankostroyeniya/>
4. Informatsiya o rezultatakh analiza sostoyaniya i razvitiya otrasli stankostroyeniya v gosudarstvakh–chlenakh TS i YEOP URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/SiteAssets/pdf
5. Stankostroyeniye v Rossii: sostoyaniye, tendentsii, perspektivy. URL: <https://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry-348.html>
6. Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability / Department of energy. URL: <https://build4scale.llnl.gov/docs/modules/Module-3C.pdf>
7. Bogutskiy, V.B., Shron, L.B., Gordeyeva, E.S. Sintez gibkikh mekhanooobratyvvayushchikh moduley dlya usloviy remontnogo proizvodstva // Theoretical & Applied Science. – 2017. – № 11 (55). – S. 101–110.
8. Seongwoo Woo. Reliability Design of Mechanical Systems. A Guide for Mechanical and Civil Engineers DOI 10.1007/978-3-319-50829-0 1 / Woo Seongwoo. – Springer International Publishing AG, 2017. – 309.
9. Kasser, J. Writing Requirements for Flexible Systems // IN-COSE-UK Spring Symposium, – 2001. P.1–8.
10. Raluca Nicolae, Anisor Nedelcu. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system // Review of the Air Force Academy. – 2015. – № 1 (28). – R. 155–158. (2015).
11. Dodla Srikanth, M. Kulkarni. Quality, Reliability and Maintenance (Q, R & M) Issues in Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 110–116. – P. 1442–1446.
12. Tiberiu S. Letia, Adina Astilean, Mihai Hulea. Analysis and Synthesis of the Flexible Manufacturing System Potential Behaviors // Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania, May 23–25, 2012. – Bucharest, 2012. – R. 248–253.
13. Bogutskiy, V.B., Shron, L.B. Otsenka nadezhnosti sintezirovannogo varianta modulya dlya mekhanicheskoy obrabotki detaley po otkazam funktsionirovaniya // Uchenyye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Nauchnyy zhurnal. № 1 (59). – Simferopol: RIO KIPU, – 2018. – S.170–176.
14. Denisenko, T.I. Ispolzovaniye markovskikh tsepey pri reshenii razlichnykh prikladnykh zadach // Fundamentalnyye issledovaniya. – 2009. – No 1. – S. 27–28.
15. Kelbert, M.YA., Sukhov, YU.M. Veroyatnost i statistika v primerakh i zadachakh. T. II. Markovskie tsepi kak otpravnaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya. – M.: MTSNMO, 2010. – 295 s.

Bogutsky Vladimir Borisovich

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., assistant professor of dept. Technology of
mechanical engineering
229053, Sevastopol, st. University, 33
Ph. +7(978)–76–72–873
E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Shron Leonid Borisovich

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., assistant professor of dept. Technology of
mechanical engineering
229053, Sevastopol, st. University, 33
Ph. +7(978)–74–47–546
E-mail: shronlb@mail.ru

М.В. ЗАМОРЁНОВ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ

Аннотация. В данной статье построена имитационная модель функционирования облачной системы асинхронной репликации данных. Данная модель позволяет определять коэффициенты готовности серверов входящих в систему асинхронной репликации. Приведен пример моделирования такой системы, определены математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение для коэффициента готовности первого сервера.

Ключевые слова: имитационное моделирование, асинхронная репликация, коэффициент готовности, математическое ожидание.

Введение.

На данный момент все больше возникает вопросов, связанных с обслуживанием потоков задач, носящих определённый или случайный характер. В связи с появлением всё большего числа различных систем и в связи с их сложностью возникает вопрос о моделировании их поведения с целью выявления корректности работы и надёжности. До настоящего времени в простейших случаях решение такого рода задач обходилось без методов моделирования.

Научный подход к задачам массового обслуживания стал применяться тогда, когда подобные проблемы стали возникать в технических системах, которые требуют повышенной точности работы и экономической эффективности решения. Первые проблемы стали возникать в телефонии массового обслуживания, расширяя сферы применения технологического прогресса, теория массового обслуживания нашла применение практических во всех сферах человеческой деятельности.

Обзор научных работ за прошедшие годы показывает, что в основном целью были оптимизация и реорганизация сферы коммуникации. Однако по мере развития технологического прогресса, это далеко не единственная сфера, требующая создания высоко нагруженных систем и бесперебойных систем. В России и во всем мире появляется огромное количество товаров и услуг, и возникают проблемы, связанные с организацией работы информационных систем, производственных процессов, пунктов торговли и обслуживания населения, рынков, супермаркетов, телефонных станций, где в качестве клиентов и обслуживающих единиц могут выступать люди. Соответственно, такие системы можно описывать с помощью методов теории обслуживания, основанных на имитационном моделировании, которые позволяют выявить возможные нагрузки, проблемы и достоинства работы систем. Важной особенностью имитационных моделей [1, 2, 3] является их достоверность, так как они наиболее полно могут описывать происходящие явления.

Основная часть

Основной проблемой при автоматизации распределенных систем является организация обработки распределенных данных. Как правило такие информационные системы предъявляют достаточно высокие требования к скорости отработки информации при условии одновременной работы большого количества клиентов. Кроме того, развиваясь, такие системы должны легко масштабироваться без ущерба для скоростных характеристик системы.

Возникает необходимость построения информационных систем, которые работают с одной базой данных распределенной на нескольких компьютерах или серверах.

Современные технологии репликации данных в настоящее время являются основным инструментом для обеспечения целостности, полноты и катастрофоустойчивости центров данных.

Все ведущие поставщики SAN (Сеть хранения данных, англ. StorageAreaNetwork) ориентированных дисковых систем предлагают их в различных вариациях в своих портфелях предложений. Примерами являются:

- Синхронная репликация – HitachiTrueCopyRemoteReplication, IBM MetroMirror (Synchronous PPRC), EMC MirrorView/Synchronous, EMC SRDF Synchronous;
- Асинхронная репликация – IBM XRC, IBM Global Copy (PPRC–XD), IBM Global Mirror (Asynchronous PPRC), IBM Metro/Global Copy (Asynchronous Cascading PPRC), Hitachi Compatible Replication for IBM® XRC (for z/OS® и OS/390®), Hitachi TrueCopy Asynchronous, Hitachi Universal Replicator for TagmaStore Universal Storage Platform

Основная технология, используемая для организации устойчивых к единичным сбоям вычислительных систем, – репликация информации в реальном времени.

В основном, практически каждый производитель систем хранения данных, уже задумывается о использовании и внедрении технологий репликации, для восстановления связи данных между удалёнными узлами, восстановления и перезапуске системы после серьёзных аварий.

Эти решения позволяют максимально оперативно принять меры по восстановлению работоспособности системы. Они дают возможность в течение нескольких минут с момента аварии запустить базу данных приложения на удалённом сайте и восстановить подключение пользователей. Репликация также используется для создания на аппаратном уровне надёжных реплик баз данных, расположенных на удалённом узле или в другом городе или даже континенте.

Репликация позволяет использовать такие операции как, обновление данные, выгрузки данных при резервном копировании в безопасное место, импортирование информации в хранилище данных и т.д.

Целью данной работы является построение имитационной модели для определения характеристик системы асинхронной репликации данных. В дальнейшем полученные результаты могут быть применены для улучшения экономичности и оптимальности работы систем асинхронной репликации данных.

Объектом проектирования является асинхронная система репликации данных, которая производит обработку данных на двух серверах.

Времена безотказной работы серверов – случайные величины (СВ) α_1 и α_2 с функцией распределения (ФР) $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$ и $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$ соответственно, времена восстановления системы – СВ β_1 и β_2 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$ и $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. При выходе из строя одного из серверов система продолжает работу, при этом производится восстановление отказавшего сервера. при выходе из строя двух серверов, система прекращает работу до тех пор, пока не восстановятся оба сервера. После восстановления система начнет работу из начального состояния.

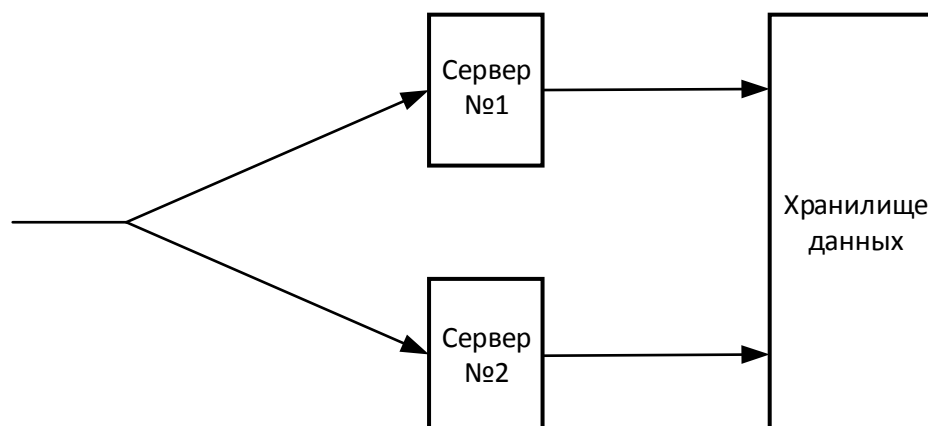


Рисунок 1 – Структурная схема системы асинхронной репликации

Построение имитационной модели системы асинхронной репликации данных проводилось в среде GPSS(GeneralPurposeSimulationSystem) – общецелевая система имитационного моделирования (СИМ), предназначенная для разработки моделей сложных систем с дискретным и непрерывным характером функционирования и проведения экспериментов с целью изучения свойств и закономерностей процессов, протекающих в них, а также выбора наилучшего проектного решения среди нескольких возможных вариантов [4,5].

Алгоритм функционирования исследуемой системы состоит из следующих шагов.

1. Генерация транзакта
2. Создание копии транзакта и запуск ее в блок DEV2(Пункт 2.2.)
 - 2.1. Проверяется возможность работы первого сервера, если первый сервер доступен переход в Пункт 2.1.1, иначе транзакт ожидает возможность работы на первом сервере.
 - 2.1.1. Выполняется работа первым сервером.
 - 2.1.2. Задержка на время работы сервера.
 - 2.1.3. Первый сервер заканчивает работу.
 - 2.1.4. Перевод устройства в состояние восстановления.
 - 2.1.5. Первый сервер восстанавливает.
 - 2.1.6. Задержка на восстановление первого сервера.
 - 2.1.7. Проверка условия, что доступен второй сервер. Если доступен переход в Пункт 2.1.8, иначе в пункт 3.
 - 2.1.8. Создание копии заявки и запуск её на обработку первым сервером (Пункт 2.1).
 - 2.1.9. Уничтожение отработавшего транзакта.
 - 2.2. Проверяется возможность работы второго сервера, если второй сервер доступен, то переход в Пункт 2.2.1, иначе транзакт ожидает возможность работы на втором сервере.
 - 2.2.1. Выполняется работа вторым сервером.
 - 2.2.2. Задержка на время работы сервера.
 - 2.2.3. Второй сервер заканчивает работу.
 - 2.2.4. Перевод устройства в состояние восстановления.
 - 2.2.5. Второй сервер восстанавливает.
 - 2.2.6. Задержка на восстановление второго сервера.
 - 2.2.7. Проверка условия доступен первый сервер. Если доступен переход в Пункт 2.1.8, иначе в пункт 3.
 - 2.2.8. Создание копии заявки и запуск её на обработку вторым сервером (Пункт 2.2).
 - 2.2.9. Уничтожение отработавшего транзакта.
3. Ситуация, когда оба сервера вышли из строя.
 - 3.1. Восстановить работу первого сервера.
 - 3.2. Восстановить работу второго сервера.
 - 3.3. Создание копии заявки и запуск её на обработку первым сервером (Пункт 2.1).
 - 3.4. Создание копии заявки и запуск её на обработку вторым сервером (Пункт 2.2).
4. Конец.

Блок–схема алгоритма представлена на рисунке 2.

Разработанная имитационная модель позволяет определить коэффициенты готовности каждого сервера. Для чего в файле отчета GPSS есть поле Util, для одноканальных устройств (рисунок 3).

Приведем пример расчета коэффициентов готовности серверов при следующих исходных данных: функции распределения времени наработки на отказ $F_1(t)$, $F_2(t)$ и восстановления $G_1(t)$, $G_2(t)$ распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \gamma_1, \gamma_2$ соответственно; причем

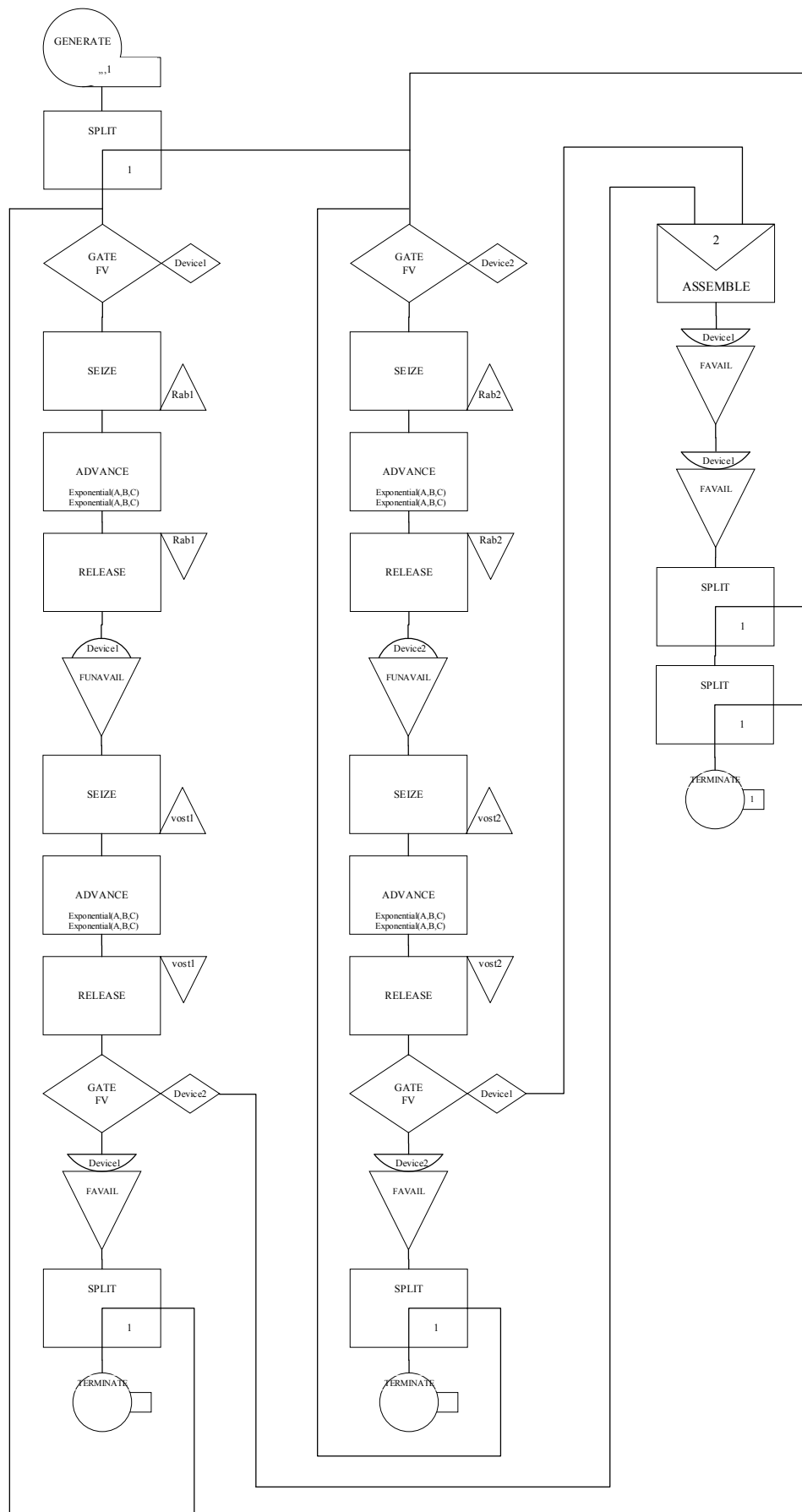


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма имитационной модели функционирования асинхронной системы репликации данных

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \quad g_2(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1},$$

где

$$\lambda_1 = 0,0444 \text{ ч}^{-1}, \lambda_2 = 0,13333 \text{ ч}^{-1}; \mu_1 = 0,05128 \text{ ч}^{-1}, \mu_2 = 0,1538 \text{ ч}^{-1};$$

$$\nu_1 = 0,6667 \text{ ч}^{-1}, \nu_2 = 2,0 \text{ ч}^{-1}; \gamma_1 = 1,3333 \text{ ч}^{-1}, \gamma_2 = 4,00 \text{ ч}^{-1}.$$

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
DEVICE1	21359	0.937	1.000	1	2	0	0	0
RAB1	750	0.999	30.377	1	1622	0	0	63
DEVICE2	21952	0.963	1.000	1	3	0	0	0
RAB2	905	1.000	25.193	1	1690	0	0	34
VOST2	904	0.041	1.023	1	0	0	0	0
VOST1	749	0.073	2.207	1	1619	0	0	0

Рисунок 3 – Отчет GPSS

Таблица 1 – Результаты эксперимента.

	Коэффициент готовности	МО	Ср. кв. отклонение
1.	0,937	0,94155	0,002247
2.	0,942		
3.	0,942		
4.	0,946		
5.	0,940		
6.	0,944		
7.	0,943		
8.	0,940		
9.	0,941		
10.	0,939		
11.	0,942		
12.	0,943		
13.	0,938		
14.	0,944		
15.	0,943		
16.	0,943		
17.	0,938		
18.	0,942		
19.	0,943		
20.	0,941		

Выводы.

Построенная имитационная модель позволяет определять коэффициенты готовности серверов системы асинхронной репликации.

В дальнейших исследованиях планируется построение аналитической модели такой системы, позволяющей определять функции распределения времен пребывания системы в

подмножествах состояний, что даст возможность использовать результаты при моделировании более сложных систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 1.10513.2018/11.12), при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-01-00392а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б.Я. Моделирование систем: Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. АСУ / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1988. – 135 с.
2. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.
3. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Т.Дж. Шрайбер; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
4. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Кудрявцев Е.М. ДМК, Пресс 2004, 5–94074–219–Х.
5. Ray J. Paul. Recent Developments in Simulation Modelling. // Journal of the Operational Research Society. – 1991. – № 35. – P. 217 — 226.

Заморёнов Михаил Вадимович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. (8692)–435137

E-mail: zamoryonoff@gmail.com

M.V. ZAMORYONOV

IMITATION MODELING OF THE PROCESS FUNCTIONING CLOUD SYSTEM OF DATA REPLICATION

Abstract. *In this article, a simulation model for the cloud asynchronous data replication system is constructed. This model allows you to determine the availability factors for servers that are part of the asynchronous replication system. An example of modeling such a system is given, the mathematical expectation and the standard deviation for the availability of the first server are determined.*

Keywords: *imitation modeling, asynchronous replication, availability factor, mathematical expectation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sovetov B.YA. Modelirovaniyesistem: Kursovoeproektirovanie: Ucheb. posobiedlyavuzovpo spec. ASU / B.YA. Sovetov, S.A. YAkovlev. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 135 s.
2. Tomashevskij V.N. Imitacionnoemodelirovanie v srede GPSS / V.N. Tomashevskij, E.G. ZHdanova. – M.: Bestseller, 2003. — 416 s.
3. ShrajberT.Dzh. Modelirovaniiena GPSS / T.Dzh. Shrajber; [per. s angl. V.I. Garchera, I.L. Shmujlovicha]; pod red. M.A. Fajnberg. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 592 s.
4. GPSS World. Osnovyimitacionnogomodelirovaniyarazlichnyhsistem / Kudryavcev E.M. DМК, Press 2004, 5–94074–219–H.
5. Ray J. Paul. Recent Developments in Simulation Modelling. // Journal of the Operational Research Society. – 1991. – № 35. – P. 217 — 226.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich

Federal State Autonomous educational institution "Sevastopol state University", Sevastopol

Candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of information technology and computer systems
299053, Sevastopol, Universitetskaya street,33

Тел. (8692)–435137

E-mail: zamoryonoff@gmail.com

Н.И. ПОКИНТЕЛИЦА, Е.А. ЛЕВЧЕНКО

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ

Аннотация. Приведены результаты анализа рабочих процессов термофрикционной обработки деталей дисковым инструментом. Представлены результаты математического моделирования динамических процессов при термофрикционной обработке деталей. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментом при обработке контрольных деталей. Приведена расчетная схема для построения соотношений, характеризующих динамику процесса термофрикционного резания сталей вследствие отклонений режимов обработки от номинальных значений. Предложенные зависимости динамики отклонений текущих параметров характеризуют технологический процесс по отношению к отклонениям от расчетных величин, использованных при назначении оптимизированного цикла.

Ключевые слова: термофрикционная обработка, цикл, дифференциальные уравнения, динамическая модель.

Введение

Современное состояние машиностроительной промышленности требует разработки и использования высокоэффективных и конкурентоспособных способов обработки металлов резанием. Для улучшения обрабатываемости используют предварительный разогрев срезаемого слоя. Это приводит к уменьшению сопротивления деформированию и предоставляет возможности повысить режимы обработки при одновременном сохранении высокой стойкости инструмента. Термофрикционная обработка (ТФО) (рисунок 1) относится к комбинированным методам, где тепловое и механическое воздействие на обрабатываемый металл обеспечивает режущий диск, который вращается с высокой скоростью (до 80 м/с) [1–3].

Решение задачи повышения производительности ТФО при одновременном улучшении качества деталей может быть обеспечено оптимизацией технологических режимов. Неточности задания параметров и их изменения в ходе технологического процесса требуют стабилизации режимов обработки, выполняемых по заранее заданной программе оптимизированного цикла, с помощью систем с обратной связью.

Для решения такой задачи необходимо построение моделей динамики отклонений текущих параметров, характеризующих технологический процесс, по номинальным величинам, использованным при назначении оптимизированного цикла [4–6].



Рисунок 1 – Процесс термофрикционной обработки металлов

Основная часть

Поскольку основные явления ТФО происходят в зоне контакта режущего диска, жестко закрепленного на шпинделе станка, и обрабатываемой заготовки, установленной в зажимном приспособлении, то определяющее влияние на характеристики процесса оказывает динамика их относительных перемещений.

Расчетная схема для построения соотношений, характеризующих динамику процесса ТФО вследствие влияния отклонений от номинальных режимов, приведена на рисунке 2.

В расчетной схеме принято:

m_1 – эквивалентная масса заготовки и зажимного приспособления. Ее изменением в процессе обработки (по сравнению с первоначальным значением) можно пренебречь с достаточной степенью точности;

m_2 – приведенная масса инструмента и узла шпинделя. При построении динамической модели считается постоянной;

$c_1, b_1; c_2, b_2$ – эквивалентная жесткость и демпфирование связи заготовки со столом станка и узла шпинделя с инструментом, соответственно;

c_3 – эквивалентная динамическая характеристика взаимодействия инструмента и заготовки в зоне их контакта при выполнении процесса ТФО;

$x_1(\tau)$ – текущее значение расстояния между столом станка и центром масс заготовки в момент времени τ ;

$x_2(\tau)$ – расстояние между центрами масс заготовки m_1 и инструмента m_2 в тот же момент времени;

$x_{1, \text{ном}}$ и $x_{2, \text{ном}}$ – значение тех же расстояний, принятые как номинальные при оптимизации процесса ТФО;

$\Delta x_1(\tau)$ и $\Delta x_2(\tau)$ – величины отклонений координат $x_1(\tau)$ и $x_2(\tau)$ от номинальных значений, соответственно;

$h(\tau)$, $h_{\text{ном}}$ и $\Delta h(\tau)$ – текущее, номинальное значение и отклонение толщины заготовки от расчетного размера.

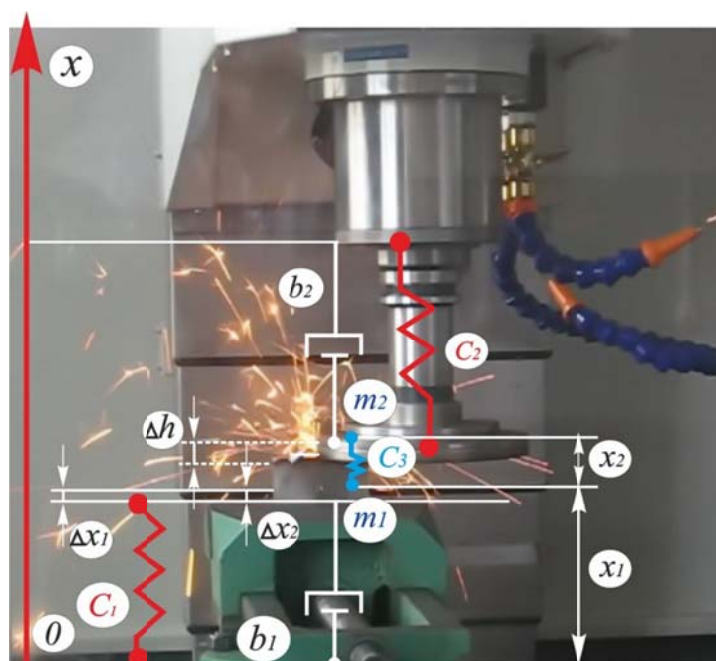


Рисунок 2 – Расчетная схема для построения модели динамики процесса ТФО

Расчетной схеме соответствуют дифференциальные уравнения, характеризующие динамику перемещений элементов системы ТФО, полученные с применением принципа Даламбера [7]

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 = c_3 x_2 \\ m_2 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 - \ddot{h}) + b_2 (\dot{x}_1 + \dot{x}_2 - \dot{h}) + c_2 (x_1 + x_2 - h) + c_3 x_2 = F(\tau) \end{cases}, \quad (1)$$

где

$$x_1(\tau) = x_{1,nom} + \Delta x_1(\tau), \quad x_2(\tau) = x_{2,nom} + \Delta x_2(\tau), \quad h(\tau) = h_{nom} + \Delta h(\tau), \quad (2)$$

и, дополнительно к обозначениям, приведенным ранее, указана возмущающая сила $F(\tau)$, причиной появления которой является неуровновешенность инструмента.

Для номинального режима ($x_1(\tau) = x_{1,nom}$, $x_2(\tau) = x_{2,nom}$, $h(\tau) = h_{nom}$) соотношения (1) приобретают вид

$$\begin{cases} c_1 x_{1,nom} - c_3 x_{2,nom} = 0 \\ c_2 [x_{1,nom} + x_{2,nom} - h_{nom}] + c_3 x_{2,nom} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя соотношение (2) в (1), запишем

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 x_{1,nom} + c_1 \Delta x_1 = c_3 x_{2,nom} + c_3 \Delta x_2 \\ m_2 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 - \ddot{h}) + b_2 (\dot{x}_1 + \dot{x}_2 - \dot{h}) + \\ + c_2 [(x_{1,nom} + x_{2,nom} - h_{nom})] + c_2 [\Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta h] + c_3 x_{2,nom} + c_3 \Delta x_2 = F(\tau). \end{cases} \quad (4)$$

С учетом первого уравнения системы (3), первое уравнение системы (4) приобретает вид

$$m_1 \Delta \ddot{x}_1 + b_1 \Delta \dot{x}_1 + c_1 \Delta x_1 = c_3 \Delta x_2. \quad (5)$$

При аналогичной операции для вторых уравнений систем (3) и (4), получим:

$$m_2 (\Delta \ddot{x}_1 + \Delta \ddot{x}_2 - \Delta \ddot{h}) + b_2 (\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{h}) + c_2 [\Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta h] + c_3 \Delta x_2 = F(\tau). \quad (6)$$

С целью разделения факторов проведем дополнительное преобразование (6), с перенесением с левой части составляющих $m_2 \Delta \ddot{h} + b_2 \Delta \dot{h} + c_2 \Delta h$, определяющих вклад возмущений от непостоянства толщины заготовки, в правую часть того же соотношения

$$m_2 (\Delta \ddot{x}_1 + \Delta \ddot{x}_2) + b_2 (\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{x}_2) + c_2 [\Delta x_1 + \Delta x_2] + c_3 \Delta x_2 = F(\tau) + m_2 \Delta \ddot{h} + b_2 \Delta \dot{h} + c_2 \Delta h. \quad (7)$$

Для дальнейшего анализа системы уравнений (5) и (7) выполним их нормирование по старшим производным. С целью обеспечения компактности знак прироста Δ в дальнейших расчетах опущен.

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \frac{b_1}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{c_1}{m_1} x_1 - \frac{c_3}{m_1} x_2 = 0 \\ (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + \frac{b_2}{m_2} (\dot{x}_1 + \dot{x}_2) + \frac{c_2}{m_2} [x_1 + x_2] + \frac{c_3}{m_2} x_2 = \ddot{h} + \frac{b_2}{m_2} \dot{h} + \frac{c_2}{m_2} h + \frac{F(\tau)}{m_2}. \end{cases} \quad (8)$$

С обозначениями

$$y_1 = x_1; \quad \dot{y}_1 = \dot{x}_1 = y_2; \quad y_3 = x_2; \quad \dot{y}_2 = \ddot{x}_1; \quad \dot{y}_3 = \dot{x}_2 = y_4; \quad \dot{y}_4 = \ddot{x}_2; \quad h = z_1; \quad \dot{h} = z_2; \quad \ddot{h} = \dot{z}_2 = z_3.$$

перепишем (8) в виде

$$\begin{cases} \dot{y}_2 + \frac{b_1}{m_1} y_2 + \frac{c_1}{m_1} y_1 - \frac{c_3}{m_1} y_3 = 0 \\ (\dot{y}_2 + \dot{y}_4) + \frac{b_2}{m_2} (y_2 + y_4) + \frac{c_2}{m_2} [y_1 + y_3] + \frac{c_3}{m_2} y_3 = \dot{z}_2 + \frac{b_2}{m_2} z_2 + \frac{c_2}{m_2} z_1 + \frac{F(\tau)}{m_2} \end{cases} \quad (9)$$

Рассматривая первое из уравнений (9) как тождество, вычтем его компоненты из второго уравнения системы

$$\begin{cases} \dot{y}_2 + \frac{b_1}{m_1} y_2 + \frac{c_1}{m_1} y_1 - \frac{c_3}{m_1} y_3 = 0 \\ \dot{y}_4 + \frac{b_2}{m_2} y_4 + (\frac{b_2}{m_2} - \frac{b_1}{m_1}) y_2 + (\frac{c_2}{m_2} - \frac{c_1}{m_1}) y_1 + (\frac{c_2}{m_2} + \frac{c_3}{m_1}) y_3 = \dot{z}_2 + \frac{b_2}{m_2} z_2 + \frac{c_2}{m_2} z_1 + \frac{F(\tau)}{m_2} \end{cases} \quad (10)$$

Соотношение (10) целесообразно представить в виде системы нормированных дифференциальных уравнений первого порядка в нормальной форме Коши, характеризующей пространство состояний данной динамической системы [8–10]

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = -\frac{b_1}{m_1} y_2 - \frac{c_1}{m_1} y_1 - \frac{c_3}{m_1} y_3; \\ \dot{y}_3 = y_4; \\ \dot{y}_4 = -\frac{b_2}{m_2} y_4 - (\frac{b_2}{m_2} - \frac{b_1}{m_1}) y_2 - (\frac{c_2}{m_2} - \frac{c_1}{m_1}) y_1 - (\frac{c_2}{m_2} + \frac{c_3}{m_1}) y_3 + \dot{z}_2 + \frac{b_2}{m_2} z_2 + \frac{c_2}{m_2} z_1 + \frac{F(\tau)}{m_2} \end{cases} \quad (11)$$

которые можно записать в векторно–матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & -\frac{c_3}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_1}{m_1} - \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_1}{m_1} - \frac{b_2}{m_2} & -\frac{c_3}{m_1} - \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot F(\tau), \quad (12)$$

или

$$\dot{Y} = A \cdot Y + B \cdot Z + C \cdot F, \quad (13)$$

где $Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}$, $\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}$ – вектор состояний системы и его производная, соответственно;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & -\frac{c_3}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_1}{m_1} - \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_1}{m_1} - \frac{b_2}{m_2} & -\frac{c_3}{m_1} - \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad \text{– матрица, характеризующая динамические}$$

свойства системы;

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad \text{– вектор состояния динамики возмущений;}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица, характеризующая динамические свойства возмущений,}$$

связанных с неровной поверхностью заготовки;

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \text{матрица, характеризующая интенсивность возмущений, связанных с}$$

неуравновешенностью инструмента;

$F = F(\tau)$ – характеристика неуравновешенности инструмента.

Заключение

Для решения задачи повышения эффективности процесса ТФО плоских поверхностей заготовок необходима стабилизация режимов обработки, выполняемых по заранее заданной программе, с помощью систем с обратной связью.

Выражения (12) или (13) представляют различные формы искомым представлений зависимости динамики отклонений текущих параметров, характеризующих технологический процесс, по отношению к отклонениям от расчетных величин, использованных при назначении оптимизированного цикла обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покинтелица Н.И. Моделирование показателей качества поверхности при термофрикционной обработке легированных сталей / Н.И. Покинтелица, Е.А. Левченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Научно-технический журнал. – Орел: Изд-во ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017. – Вып. №4–1(324). – С. 48 – 56. ISSN 2073–7408.
2. Pokintelitsa N. Application of Thermo-Frictional and Mechanical Treatment Complex Method for Production of Parts with Specific Properties / N. Pokintelitsa, E. Levchenko Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE–2017) 2017. – Т 206. – S. 1326 – 1332.
3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. Покинтелица Н.И. Теплообразование и температура в зоне резания при высокоскоростной обработке сталей режущим диском / Н.И. Покинтелица, Е.А. Левченко, О.С. Кравченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып.8: в 2 ч. Ч2. – С. 159 – 168. ISSN 2071–6168.
5. Якимов А.В. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин / А.В. Якимов, Б.О. Ткаченко, С.Г. Зимин, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.
6. Дерусо П. Пространство состояний в теории управления / П. Дерусо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1979. – 620 с.
7. Нечаев К.Н. Анализ технологических возможностей термофрикционного упрочнения деталей // Металлообработка. – 2011. – №5. – С. 34–37.
8. Pokintelitsa N. Projecting Parameters of a Microprofile for a Surface Obtained as a Result of Thermofrictional Treatment // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016/ N. Pokintelitsa, E. Levchenko// Procedia Engineering, vol. 150(2016), pp 1013–1019.
9. Кравченко О.С. Деформационные и тепловые явления в зоне термофрикционного резания металла / О.С. Кравченко, Н.И. Покинтелица // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – Пермь: ПНИПУ, 2016. – Т. 18. – №1. – С. 7–20.
10. Крыськов А.Д. Технология фрикционного формообразования: монография / А.Д. Крыськов. – Кировоград: РВЛ КНТУ, 2008. – 303 с.

Покинтелита Николай Иванович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
«Пищевые технологии и оборудование»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
тел.: +7 (978) 7679653,
E-mail: NIPokintelitsa@sevsu.ru

Левченко Елена Александровна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры
«Технология машиностроения»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
тел.: +7 (978) 7679652,
E-mail: ealev1978@mail.ru

N.I. POKINTELITSA, E.A. LEVCHENKO

**DYNAMIC INDICATORS OF THE PROCESS
THERMOFRICTION STEEL CUTTING**

Abstract. *The results of the analysis of the working processes of thermofrictional machining of parts with a disk tool are given. The results of mathematical modeling of dynamic processes during thermofrictional processing of parts are presented. The results of theoretical studies are confirmed by experiment in the processing of control parts. The calculation scheme for constructing the relationships characterizing the dynamics of the process of thermofrictional cutting of steels due to deviations of processing regimes from nominal values is given. The proposed dependencies of the dynamics of deviations of current parameters characterize the technological process with respect to deviations from the calculated values used in the assignment of the optimized cycle.*

Keywords: *thermofrictional processing, cycle, differential equations, dynamic model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pokintelica N.I. Modelirovanie pokazatelej kachestva poverhnosti pri termofrikcionnoj obrabotke legirovannyh stalej / N.I. Pokintelica, E.A. Levchenko // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – Orel: Izd-vo OGU imeni I.S. Turgeneva, 2017. – Vyp.№4–1(324). – S. 48 – 56. ISSN 2073–7408.
2. Pokintelitsa N. Application of Thermo–Frictional and Mechanical Treatment Complex Method for Production of Parts with Specific Properties / N. Pokintelitsa, E. Levchenko Procedia Engineering 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE–2017) 2017. – T 206. – S. 1326 – 1332.
3. Talantov N.V. Fizicheskie osnovy protsessa rezaniia, iznashivaniia i razrusheniia instrumenta. M.: Mashinostroyeniye, 1992. 240 s.
4. Pokintelica N.I. Teploobrazovanie i temperatura v zone rezaniya pri vysokoskorostnoj obrabotke stalej rezhushchim diskom / N.I. Pokintelica, E.A. Levchenko, O.S. Kravchenko // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – Vyp.8: v 2 ch. Ch2. – S. 159 – 168. ISSN 2071–6168.
5. Iakimov A.V., Tkachenko B.O., Zimin S.G., Iakimov A.A. i dr. Osnovy teorii teplovykh iavlenii pri shlifovanii detalei mashin. Odessa: OGPU, 1997. 272 s.
6. Deruso P., Roj R., Klouz Ch. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya. M.: Nauka, 1979.–620 s.
7. Nechaev K.N. Analiz tekhnologicheskikh vozmozhnostey termofrikcionnogo uprochneniya detalej // Metalloobrabotka. 2011. №5. S. 34–37.
8. Pokintelitsa N. Projecting Parameters of a Microprofile for a Surface Obtained as a Result of Thermofrictional Treatment // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016/ N. Pokintelitsa, E. Levchenko// Procedia Engineering, vol. 150(2016), pp 1013–1019.
9. Kravchenko O.S. Deformatsionnye i teplovye iavleniia v zone termofriktsionnogo rezaniia metalla / O.S. Kravchenko, N.I. Pokintelitsa // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta.– Perm: PNIPU, 2016.– T. 18.– №1. –S. 7–20.
10. Kryskov A.D. Tekhnologiya frikcionnogo formoobrazovaniya: monografiya / A.D. Kryskov. Kirovograd: RVL KNTU, 2008. 303 s.

Pokintelitsa Nikolay Ivanovich

Sevastopol State University, Sevastopol
Dr.Sci.(Eng.), Professor, Head of the Department of
Food Technologies and Equipment
299053, Sevastopol., 33, Universitetskaya street,
Ph: +7 (978) 7679653,
E-mail: NIPokintelitsa@sevsu.ru

Levchenko Elena Aleksandrovna

Sevastopol State University, Sevastopol
Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of
Technology of Mechanical Engineering
299053, Sevastopol., 33, Universitetskaya street,
Ph: +7 (978) 7679652,
E-mail: ealev1978@mail.ru

В.П. ПОЛИВЦЕВ, В.В. ПОЛИВЦЕВ

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ РЕЗКИ ЛЕНТЫ НА ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПЛАСТИНЫ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы автоматизации процессов резки трансформаторных пластин, их пакетирования и укладки в тару для последующего изготовления сварочных трансформаторов.

Представлены общий вид, описание конструкции и работы линии резки трансформаторной ленты на пластины, а также отдельных узлов и механизмов линии. Приведена пневматическая принципиальная схема линии. Разработана система управления и программное обеспечение линии на основе контроллеров FECTO FEC FC640, SEC-AC и SPS 200. Линия обладает высокой универсальностью и производительностью.

Ключевые слова: Сварочные трансформаторы, автоматическая линия, трансформаторные пластины, резка ленты.

Введение

Изготовление оборудования для сварки электрическим током основано на сварочном трансформаторе. Для проведения различного вида сварочных работ требуется большое разнообразие сварочного оборудования. Номенклатура сварочных трансформаторов, выпускаемых на предприятии «СЕЛМА» (г. Симферополь) представляет больше десятка видов. Каждый трансформатор состоит двух, трех разных по длине и собранных в пакеты от 100 до 200 пластин. Общая номенклатура трансформаторных пластин составляет 40...50 видов с шириной от 25 мм до 80 мм и длиной от 60 мм до 360 мм и толщиной – 0,5 мм. Автоматизация такого производства сталкивается с противоречивой задачей. С одной стороны, необходимо выпускать большое количество пластин и иметь высокопроизводительное оборудование, а с другой выпускать большое разнообразие пластин и универсальное оборудование, как правило, менее производительное. Целью проектирования работ для автоматизации производства завода «СЕЛМА» было создание высокопроизводительного и в тоже время универсального оборудования для изготовления трансформаторных пластин.

Основная часть

Трансформаторная сталь поступает в виде ленты скрученной в катушки. Катушка с трансформаторной лентой шириной 600 мм режется на ленты требуемой ширины и наматывается в катушку. Затем лента из катушки режется на пластины. Спроектированная и внедренная в производство автоматическая линия предназначена для резки ленты из трансформаторной стали на пластины, стапелирования пакета пластин, определения высоты пакета, его обвязки и укладки пакета в тару. Линия состоит из машины резки 1, установленной на основании 2 (рисунок 1). На данном основании 2 установлен механизм резки 3. На приводе подачи машины резки 1, закреплена каретка 4. В нижней части основания 2 закреплен блок управления 5. На основании 2 установлен пульт управления 6. В состав линии входит обвязочная машина 7, на столе которой установлена позиция стапелирования 8. На другом основании 9, установлен трехкоординатный манипулятор 10 с захватом 11, однокоординатный переключатель 12 с магнитным захватом 13. На подвижной каретке 14 устанавливаются два контейнера 15 для укладки обвязанных пакетов.

Работа линии заключается в следующем:

Лента подается в машину резки из размоточного и подающего механизма (на рисунке не изображены) проходит через узел рихтовки, каретку 4 и через механизм резки. Привод машины резки за счет зажима ленты в каретке подает ее в механизм резки на заданную длину. Привод подачи ленты – электромеханический (DGE-63-500-ZR-LK-RV-GK-RF-KG-SE) с датчиком обратной связи, позволяет подавать ленту на длину от 60 мм до 400 мм с различными скоростями и законом торможения в конце хода. Длина пластины задается программно с пульта управления 6. Механизм резки отрезает пластину, которая лежит на приемном лотке. Переключатель магнитным захватом захватывает пластину с лотка и подает ее на позицию стапелирования и возвращается в исходное положение. Затем привод машины 1

подаст следующий отрезок ленты в механизм резки 3 и весь цикл резки и укладки повторяется. Количество пластин в пакете задается программно с пульта управления 6. После набора в стапелирующей позиции 8 полного пакета пластин механизм резки и подачи ленты отключается. Привод стапелирующей позиции подводит пакет в зону обвязки, при этом он сдвигает по столу ранее обвязанный пакет из зоны обвязки в зону захвата манипулятором. Формирователи пакета на позиции обвязки раздвигаются, механизм возвращается назад, пакет остается под обвязочным узлом, а формирователи на исходной позиции сдвигаются. Затем резка и стапелирование пакета повторяются. В это время манипулятор крючками захвата за обвязочную ленту захватывает и поднимает пакет, и согласно программы укладывает его в контейнер 15. Резка пластин и формирование пакетов, их обвязка и укладка в тару контейнера происходит до его заполнения. Затем вручную сдвигается каретка 14, полный контейнер подается под выгрузку тельфером, а пустой оказывается в зоне загрузки манипулятора. При переустановке контейнеров работа линии не останавливается.

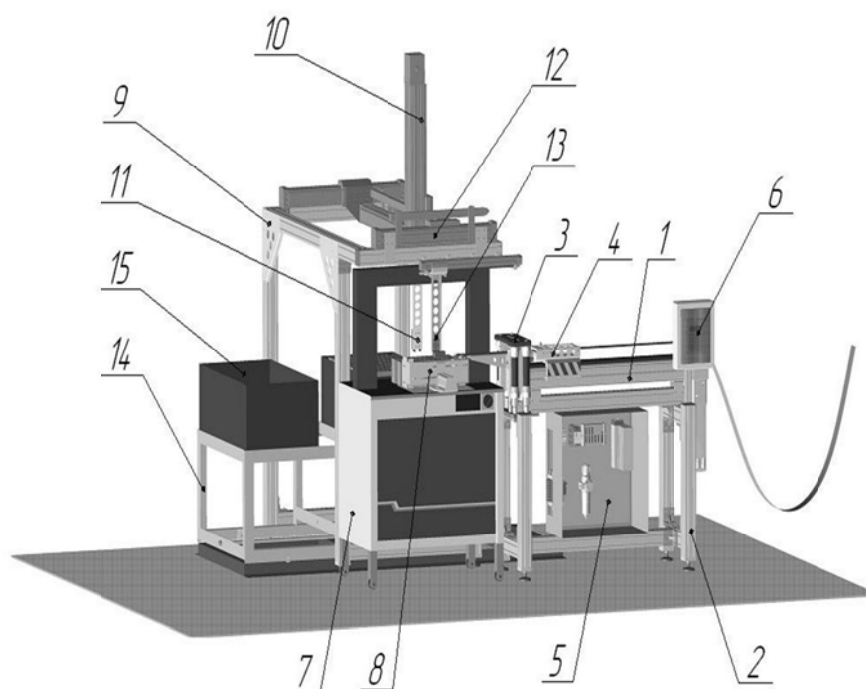


Рисунок 1 – Общий вид линии

Позиция резки состоит из неподвижного основания 1, подвижного основания 2, неподвижной части направляющих основания 3, подвижных круглых направляющих 4 помещенных в основание 3 и соединенных с подвижной планкой 5 (рисунок 2). По высоте основание 3 установлено на основании 1 с помощью четырех шпилек 6. К неподвижной направляющей 3 крепится планка 7, на которой устанавливается неподвижный нож. Подвижный нож крепится к планке 5. Под торцами круглых направляющих установлены цилиндры 8, штоки которых упираются в торец направляющих. Подвижное верхнее основание 2 и неподвижное основания 1 соединены четырьмя пневмомускулами.

Работа механизма резки основана на подаче сжатого воздуха в четыре пневмомускула 9, которые начинают расширяться, при этом уменьшая свою длину и перемещая планку 2, 5 вместе с подвижным ножом вниз. Перемещение происходит по направляющим 3 и 4. Усилие, развиваемое одним мускулом – 5500 Н при 6 барах давления подаваемого в него сжатого воздуха, передается верхнему ножу, который вместе с нижним ножом режет ленту на пластины. При снятии давления из пневмомускулов 9 основание 2 возвращается в вернее положение. Для ускорения процесса возврата основания в цилиндры 8 подается давление сжатого воздуха, штоки которых возвращают планку 2 в исходное положение.

Каретка для подачи ленты в механизм резки включает П-образный корпус 1, внутри которого помещены три пары направляющих роликов 2 (рисунок 3). Для регулировки

ширины ленты в каретке предусмотрены две направляющие 3. В начале каретки расположен механизм зажима ленты, состоящий из прижимной планки 4, подставки 5 и мембранного привода 6.

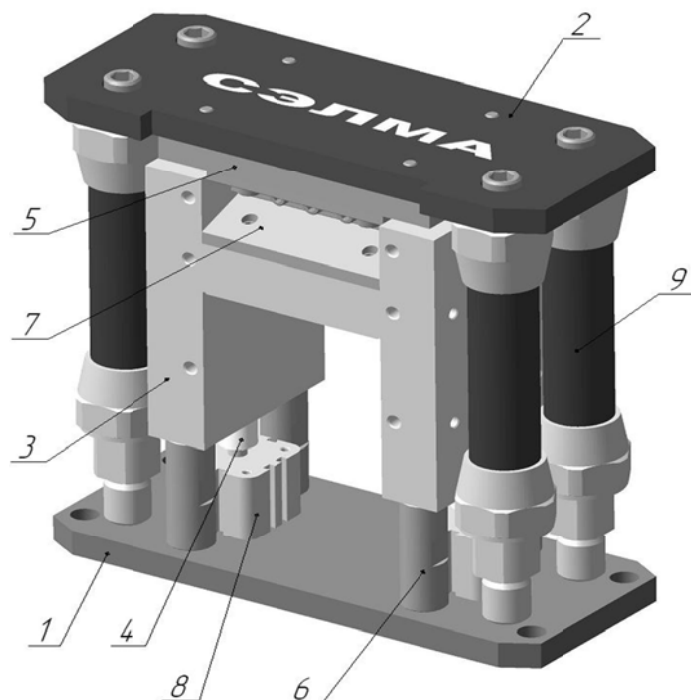


Рисунок 2 – Механизм резки ленты

Каретка за счет перемещения электромеханического привода при движении «назад» при разжатом приводе 5 скользит в направляющих 2 и 3 относительно ленты, а при движении «вперед» прижатом приводе подает и направляет ленту в механизм резки.

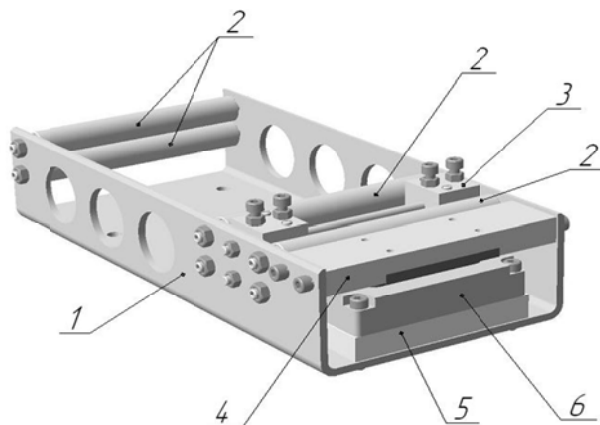


Рисунок 3 – Каретка для подачи ленты

Позиция стапелирования пластин состоит из основания 1 закрепленного на столе обвязочной машины с помощью подкладки 2 и четырех болтов (рисунок 4). К основанию 1 с возможностью регулировки по пазам закреплен кронштейн 3, на котором установлен пневмоцилиндр 4. На штоке пневмоцилиндра 4 установлена пластина с направляющими закрепленная к кронштейну 5. Кронштейн 5 в свою очередь соединен с пластиной 6. Для регулировки длины стапелирующего пакета в пластине сделаны пазы, в которые помещены крепления двух кронштейнов 7. На кронштейнах 7 закреплены пневмоцилиндры 8. На штоках пневмоцилиндров 8 установлены пластины с направляющими закрепленными к щекам 9. На щеках 9 установлены неподвижно по угольнику 10 и подвижно по пазам уголки

11. Пазы в щеках 10 обеспечивают регулировку по ширине пакета. Регулировка по длине настраивается от 100 до 400 мм, по ширине от 25 до 80 мм. Центр пластины в направлении оси подачи ленты в зависимости от ширины настраивается по пазам кронштейна 3.

Работа позиции заключается в следующем:

Позиция должна быть настроена под конкретный размер по длине и ширине пластины. Пластина линейным приводом подается и останавливается над позицией стапелирования. Магнитный захват отпускает пластину, она направляется деталями 9, 10, 11 и падает на дно стола стапелирования. Затем подается следующая пластина и так до полного пакета. Когда полный пакет пластин уложен от системы управления подается команда, срабатывает цилиндр 4, шток начинает выдвигаться и механизм детали 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 вместе с пакетом пластин перемещаются под позицию обвязки. После достижения цилиндром крайнего положения от сигнала системы управления начинают раздвигаться штоки цилиндров 8 вместе с деталями 9, 10, 11. Шток цилиндра 4 втягивается, затем сдвигаются штоки цилиндров 8. Затем весь цикл повторяется.

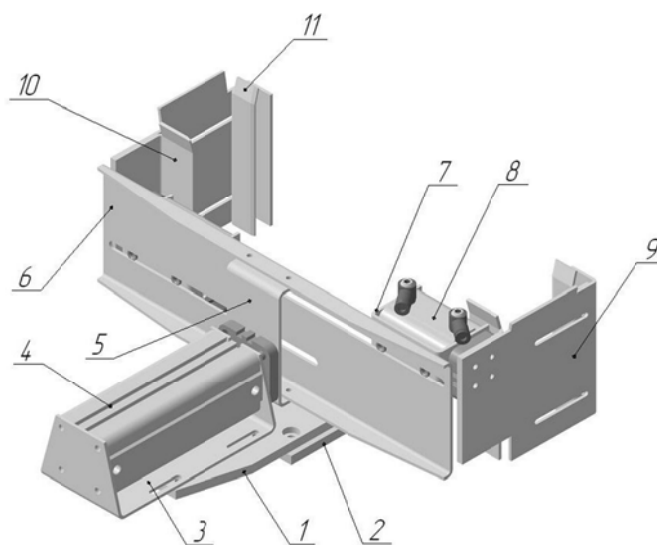


Рисунок 4 – Позиция стапелирования пластин

На основании 1 выполненного из стандартных профилей 80x80 фирмы Фесто закреплены трехкоординатный манипулятор и однокоординатный переключатель (рисунок 5).

Манипулятор имеет две поперечные оси 2 (DGPL-50-500-PPV-A-B-KF-GK-SH-D2), установленные параллельно друг к другу, продольную ось 3 (DGPL-50-1250-PPV-A-B-KF-GK-SH-MP1), закрепленную на каретках поперечных осей 2 и вертикальную ось 4 (DGPI-63-500-PPV-A-IF-KF-GK-SH-AU), каретка которой установлена на каретку продольной оси 3. К вертикальной оси 4 закреплен захват 5. На основании 1 закреплен переключатель 6 на каретке которого установлен электромагнитный захват 7. Каждая ось манипулятора оснащена пневматическим линейным приводом, датчиком линейных перемещений и для управления приводом пропорциональным клапаном расхода. Такой тип привода позволяет останавливать каретку в любой точке диапазона перемещений привода и задавать скорость перемещений и закон торможения каретки.

Захват обвязанного пакета трансформаторных пластин состоит из Г-образного кронштейна верхняя часть которого крепится к манипулятору, а в нижней закреплена направляющая планка. В планку помещены две подвижные подпружиненные планки, на которых закреплены крючки. Захват пакета происходит путем подвода крючков под обвязочную ленту и подъема вверх захвата с помощью манипулятора.

В качестве привода переключателя используется бесштоковый пневмоцилиндр (DGPL-25-500-PPV-A-B-KF) с кареткой. Остановка каретки происходит по конечным настраиваемым упорам с демпфированием в конце хода.

Захват переключателя пластин из лотка после резки в позицию стапелирования пакета состоит из кронштейна, верхняя часть которого крепится к каретке привода переключателя, а

в нижней части закреплен Г-образный кронштейн. На плоскости кронштейна закреплены два электромагнита. Электромагниты захватывают отрезанную пластину за ее верхнюю плоскость.

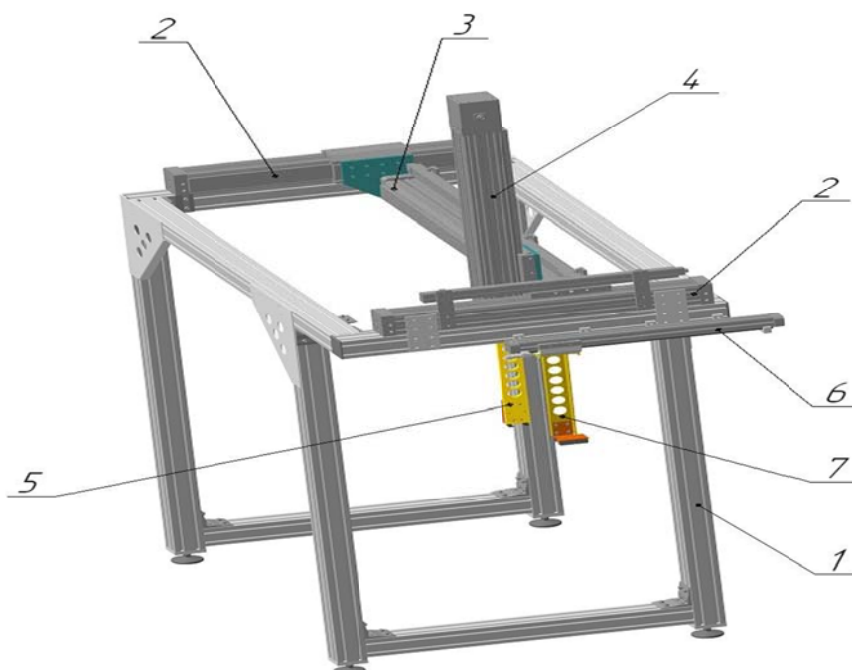


Рисунок 5 – Трехкоординатный и однокоординатный манипуляторы

Пневматическая схема линии, представленная на рисунке 6 состоит из двух блоков подготовки воздуха 0.1, 0.2 с ручными вентилями 0.01 и 0.02. Блок подготовки воздуха 0.2 предназначен для подачи сжатого воздуха на трех координатный манипулятор состоящий из трех пневматических осей, каждая из которых состоит из бесштокового цилиндра 13.0 (14.0, 15.0) и пропорционального регулятора расхода 13.1 (14.1, 15.1). Блок подготовки воздуха 0.1 подает сжатый воздух на механизм резки пластин, устройства прижима ленты, однокоординатный переключатель, привод захвата манипулятора и позицию стапелирования. Механизм резки пластин состоит из четырех пневмомускулов 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, клапанов быстрого сброса 1.01, 2.01, 3.01, 4.01, и 5/2-распределителей 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 с односторонним электромагнитным управлением. Для быстрого обратного хода пневмомускулов и ножей в конструкции предусмотрены два пневмоцилиндра одностороннего действия 5.0 и 6.0. Привод устройства для прижима ленты при ее транспортировании и резке выполнен в виде двух пневмокамер 7.0 с соответствующими 3/2-распределителями с электромагнитным управлением, находящихся в секции N пневмоострова 7.1–12.1. Привод переключателя выполнен на базе бесштокового пневмоцилиндра 8.0, с дросселями, обратными клапанами 8.01, 8.02 и 5/2-распределителем с электромагнитным управлением, находящимся в секции M пневмоострова 7.1–12.1. Привод 9.0, с соответствующим 5/2-распределителем с электромагнитным управлением, находящимся в секции M пневмоострова и дросселями с обратными клапанами 9.01, 9.02, установлен в захвате 5 (рисунок 5) трехкоординатного робота. Пневмоцилиндры 10.0 и 11.0 с соответствующими распределителями предназначены для раскрытия и закрытия губок стапелирующего устройства, представленного на рисунке 4. Пневмоцилиндр 12.0, дроссели с обратным клапаном 12.01, 12.02 и 5/2-распределитель относятся к позиции стапелирования пластин и предназначены для подачи пакета под позицию обвязки.

Структурная схема системы управления линией представлена на рисунке 7 [2]. Система управления автоматической линией состоит из трех контроллеров: промышленный контроллер серии FEC Standard FC640, контроллер SPC 200, контроллер серводвигателя электромеханической оси SEC-AS.

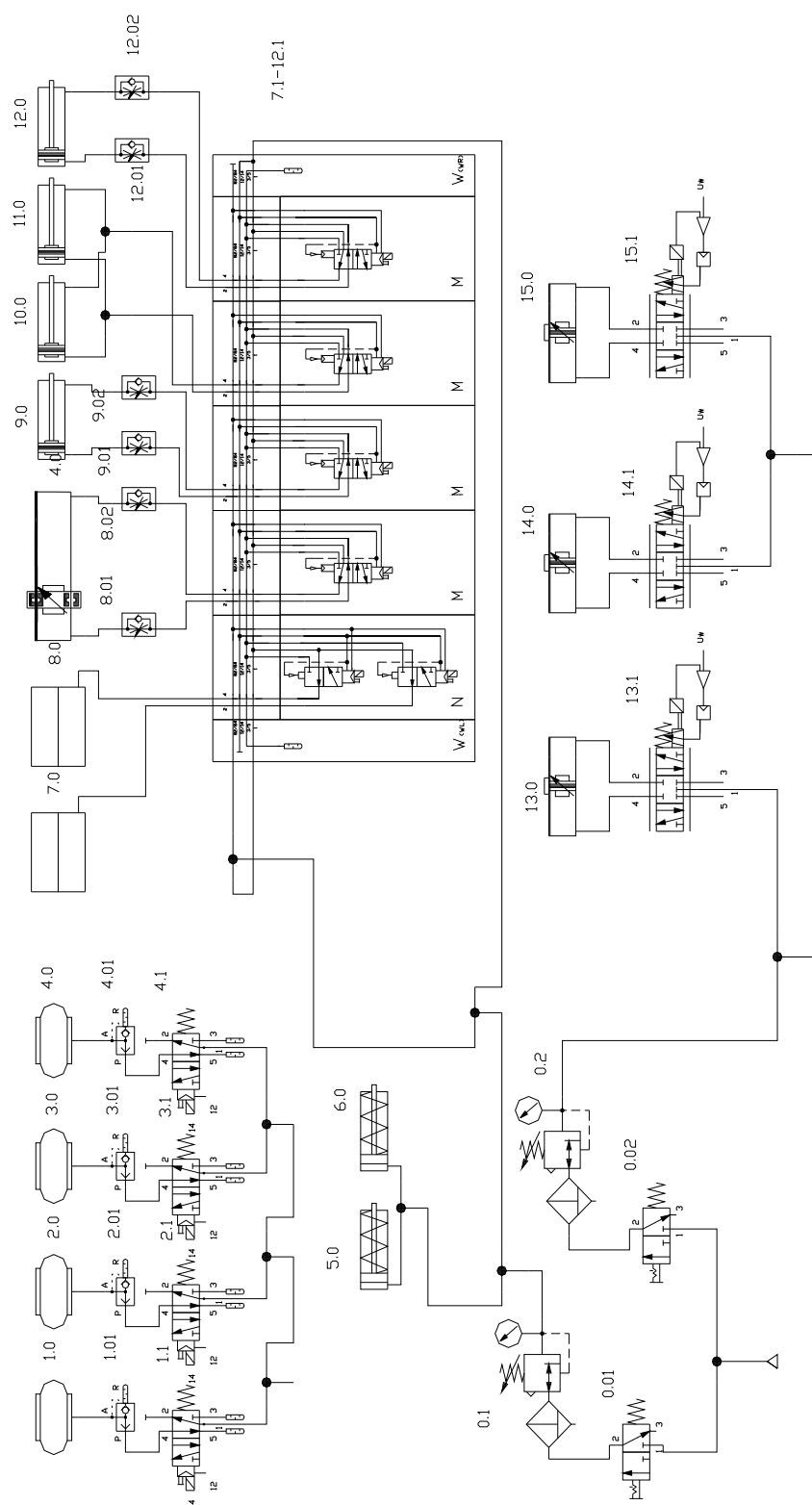


Рисунок 6 – Пневматическая принципиальная схема линии

Контроллер FC640 включает два интерфейса RS 232 с 32 дискретными входами и 16 дискретными выходами, а также сетевым интерфейсом. Этот контроллер выступает как контроллер верхнего уровня и связан с двумя другими контроллерами, а также пневмоостровом, датчиками и панелью управления HMI FED 90. Контроллер управляет всей системой в целом. Пневматический остров управляет работой пневматических исполнительных механизмов (пневмоцилиндрами, пневмокамерами прижима ленты). К дискретным выходам контроллера подключены распределители пневмомускулов, являющиеся силовыми приводами механизма резки ленты, привод оси переключника

пластин. К входам контроллера подключены датчики конечных положений механизма резки, переключателя и др.

Контроллер SPC 200 управляет тремя осями DGP манипулятора через интерфейсы SPS–AIF и пропорциональными клапанами МРУЕ. Контроллер предназначен для позиционирования каретки пневматической оси с обратной связью по ее положению. Датчик обратной связи каретки пневматической оси потенциометрического типа. Контроллер позволяет одновременный запуск двух программ. В данной системе программа считывает состояние датчика на захватном органе и в случае получения сигнала от этого датчика (что соответствует приближению захвата к какой-либо горизонтальной поверхности) выдается сигнал на остановку движения (вниз) захвата вертикальной оси и выдается команда на переход на следующий шаг программы. Этим способом реализуется укладка обвязанных пакетов на любую высоту контейнера не зависимо то высоты пакетов. Подобная система позволяет предотвращать аварийные ситуации.

Контроллер SEC-AS предназначен для управления параметрами серводвигателя: остановка исполнительного звена в точке позиционирования, скоростью перемещения, моментом (на валу двигателя) или усилием на каретке за счет величины подаваемого тока. Серводвигатель MTR-AC-100 соединен зубчатым ремнем с кареткой электромеханической оси и преобразует вращательное движение вала двигателя в поступательное перемещение каретки.

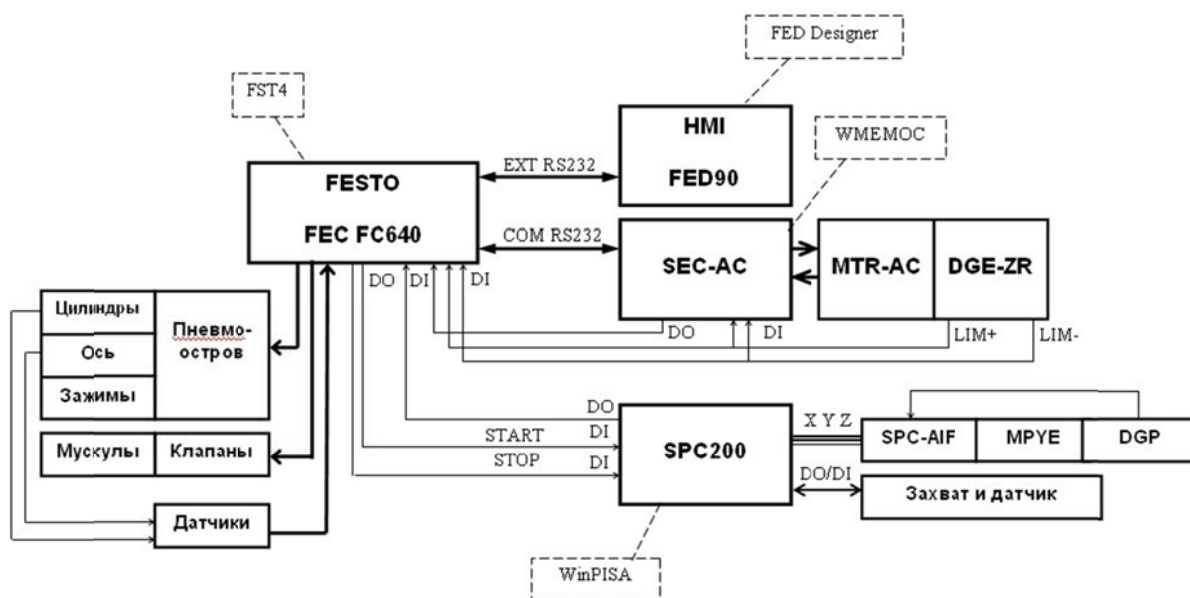


Рисунок 7 – Блок-схема системы управления линией

Система электропневмоуправления состоит из герметичного шкафа 10 (рисунок 8) внутри которого помещены электрическая и пневматические части управления линией. Электрическое питание включается и отключается переключателем 9. От блока питания 1, подается напряжение на контроллер 2 управления манипулятором. От аналогичного блока питания 3 питание подается на специализированный контроллер 4 управляющий серводвигателем привода подачи ленты. Для управления всей линией используется контроллер 5. Подвод сжатого воздуха производится через блок подготовки воздуха с измерительным манометром 6, а затем по пневмошлангам в пневмоостров 7. Для возможности программирования контроллеров от ЭВМ используется разъем 8.

Заключение

Автоматическая линия позволяет в 2–3 раза повысить производительность труда за счет быстродействия достигнутого путем небольшого времени цикла резки и укладки пластин в пакеты. Заменяет несколько специализированных линий резки за счет универсальности по возможности резки – ширины пластины от 25мм до 100 мм и длины пластины от 60 мм до 360 мм при малом времени переналадки с одного вида пластин на другие.

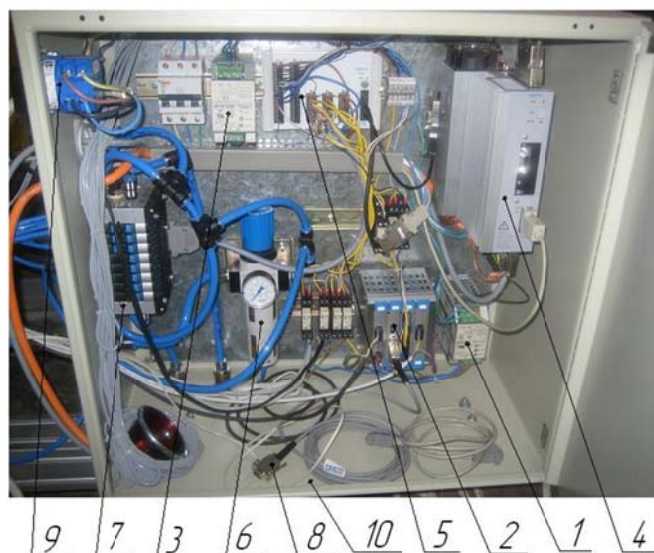


Рисунок 8 – Шкаф управления линией

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашков Е.В. Промышленные механотронные системы на основе пневмопривода: Учеб. Пособие / Е.В.Пашков, Ю.А. Осинский. – Севастополь: Изд – во СевНТУ, 2007. – 401с.
2. Нотченко Г.В. Система управления для автомата порезки и пакетирования пластин магнитопроводов электросварочных аппаратов / В.Г. Нотченко. – Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2008. – Вып.88. – С. 135–138.

Поливцев Виктор Петрович

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат технических наук, заведующий НИЛ «ЭСЖБО»
99053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +7(978) 861–50–57
E-mail: polivcev.viktor@yandex.ru

Поливцев Владимир Викторович

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Руководитель научной группы НИЛ «ЭСЖБО»
99053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. +7(978) 745–20–25
E-mail: vovapolivcev@yandex.ru

V.P. POLIVCEV, V.V. POLIVCEV

AUTOMATIC LINE OF TAPE CUTTING ON TRANSFORMER PLATES

Abstract. Automation of transformer plates cutting, bunching and packing into container for further manufacturing of wilding transformers is observed. Overview, design description and functioning of automated line of cutting of transformers belt is presented. Separated units and mechanisms of line are also described. Pneumatic circuit diagram is presented. Control system and software on base of FESTO programmable controllers FEC FC640, SEC-AC and SPS 200 had been developed. Automated line has high universality and productivity.

Keywords: Welding transformers, automatic line, transformer plates, ribbon cutting.

BIBLIOGRAPHY

1. Pashkov E.V. Promyshlennyye mekhanotronnyye sistemy na osnove pnevmoprivoda: Ucheb. Posobie / E.V.Pashkov, YU.A. Osinskij. – Sevastopol: Izd – vo SevNTU, 2007. – 401s.
2. Notchenko G.V. Sistema upravleniya dlya avtomata porezki i paketirovaniya plastin magnitoprovodov ehlektrosvarochnyyh apparatov / V.G. Notchenko. – Vestnik SevGTU. Ser. Mekhanika, ehnergetika, ehkologiya: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2008. – Vyp.88. – S. 135–138.

Polivcev Viktor Petrovich

FGAOU VO Sevastopolskij tekhnicheskij universitet, g. Sevastopol
Kandidat tekhnicheskikh nauk, docent kafedry PSiATP
ul. Universitetskaya, 33 g. Sevastopol, Rossiya. 99053

Polivcev Vladimir Viktorovich

FGAOU VO Sevastopolskij tekhnicheskij universitet, g. Sevastopol
ul. Universitetskaya, 33 g. Sevastopol, Rossiya. 99053
E-mail: vovapolivcev@yandex.ru

А.В. АНЦЕВ

УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ФАКТОРА СЛУЧАЙНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Аннотация. Управление надежностью режущего инструмента предусматривает действия, направленные на изменение параметров инструмента, характеристик и условий обработки. К условиям обработки относят, например, обрабатываемый материал, технологическое оборудование, режим резания, порядок технического обслуживания, восстановления и ремонта. Для управления надежностью режущего инструмента предлагается математическая модель, учитывающая факторы случайности процесса резания. С таким фактором можно отнести: разброс режущих свойств инструмента; разброс параметров заготовок и возможность разрушения режущего клина инструмента. В качестве критерия оптимальности при оптимизации режимов резания предлагается использовать удельные затраты. Удельные затраты включают в себя затраты на обработку, затраты на восстановление режущего инструмента и затраты на брак или контроль режущего инструмента. Представлена числовая иллюстрация управления надежностью режущего инструмента с учетом фактора случайности процесса резания. Управление надежностью режущего инструмента с помощью предложенной модели позволит снизить удельные затраты процесса резания на 65 %.

Ключевые слова: управление надежностью, режущий инструмент, стохастическая модель, удельные затраты, режимы резания, оптимизация

Введение

В современном мире постоянно увеличивается значение машиностроения. На машиностроение по стоимости приходится до 40 % производства всей продукции обрабатывающей отрасли мира [1]. В России удельный вес продукции машиностроения в общем объеме промышленности достигает 20 % [2]. При этом одним из важнейших технологических процессов при производстве продукции машиностроения является обработка резанием. По экспертным оценкам, 15 % стоимости деталей узлов и машин, производимых в мире, приходится на операцию обработки резанием [3]. Не смотря на постоянное появление новых технологий обработки в машиностроении, традиционная обработка металлов резанием является, и в ближайшие десятилетия будет оставаться, основным способом изготовления деталей узлов и машин.

Однако, несмотря на научные исследования, большой опыт промышленности в этой области и экономическую важность операции резания, процесс обработки резанием нуждается в углубленном изучении, что подтверждается низкой предсказательной способностью известных моделей резания и их эффективностью лишь в относительно узких и неизменных условиях эксплуатации [4]. Данное обстоятельство приводит, в том числе, к следующим проблемам при обработке резанием на машиностроительных предприятиях [4, 5]:

- 1) рациональные режимы обработки используются только для 48 % операций. В среднем режимы резания занижаются технологами на 40 %;
- 2) только 57 % инструментов используются до достижения суммарного расчетного периода стойкости.

В современном машиностроении традиционно при решении задачи оценки периода стойкости режущего инструмента и назначении режимов резания используют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов резания и не учитывающие стохастическую природу износа режущего инструмента, что не позволяет учесть фактор случайности при оптимизации режимов резания и режима профилактики режущего инструмента. В литературе встречаются различные виды стойкостной зависимости, причем каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Ни одна из известных стойкостных зависимостей не имеет убедительного физического обоснования. В узких диапазонах изменения скорости резания может быть использована любая из них при соответствующем подборе параметров. При этом период стойкости режущего инструмента является случайной величиной, зависящей от разброса режущих свойств инструментов одной партии, разброса твердости и припуска заготовок и

стохастического характера процесса износа.

Игнорирование фактора случайности оказывает негативное влияние на эффективность обработки резанием вследствие:

- увеличения основного времени, необходимого на изготовление узлов и деталей машин из-за назначения неоптимальных режимов резания;
- снижения эффективности использования ресурса режущего инструмента. Период стойкости режущего инструмента в пределах одной партии имеет широкий разброс (15 – 35 %). Если время работы режущего инструмента определяется наихудшим экземпляром в партии, то ресурс наиболее стойких экземпляров режущего инструмента при фиксированной наработке будет использован не более чем на 65 %;
- снижения коэффициента использования металлорежущего оборудования и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени, требуемого на обслуживание и замену режущего инструмента;
- повышения уровня риска при производственной реализации технологических проектных решений, существенно влияющих на качество изделий;
- повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом режущего инструмента во время обработки.

Вопросы создания, включая проектирование, расчеты и оптимизацию параметров режущего инструмента, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки, исследовали многие отечественные и зарубежные авторы. При этом много исследований посвящено вопросам оценки периода стойкости режущего инструмента и назначения режимов резания с использованием стойкостных зависимостей, описывающих лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов резания, и проблема учета стохастической природы процесса резания при оценке периода стойкости режущего инструмента и назначении периодичности его восстановления и режима резания не нашла окончательного решения.

Таким образом, учет стохастической природы процесса резания при управлении надежностью режущего инструмента путем изменения условий обработки за счет назначения периодичности восстановления режущего инструмента и режима резания является актуальной научной проблемой. При этом под управлением надежностью режущего инструмента понимается изменение показателей надежности режущего инструмента при неизменной средней наработке между отказами или ее увеличении. Решению данной научной проблемы и посвящена представленная работа.

Теория

Продолжительность или объем работы режущего инструмента, выраженные интервалом времени, массой или объемом снятого материала, длиной пути резания, площадью обработанной поверхности или числом обработанных заготовок называют наработкой режущего инструмента. Нарботка между отказами режущего инструмента это наработка нового или восстановленного режущего инструмента от начала резания до отказа. Период стойкости T является частным случаем временной наработки до отказа и между отказами, когда наработка выражена временем резания [6]. Существует связь между периодом стойкости и наработкой между отказами, например, временная наработка между отказами, выраженная машинным временем T_M , и период стойкости T связаны зависимостью:

$$T_M = T \frac{l_{\text{р.х.}}}{l_{\text{рез}}} = T \frac{t_{\text{р.х.}}}{t_{\text{рез}}},$$

где $l_{\text{р.х.}}$ и $t_{\text{р.х.}}$ – соответственно длина и время рабочего хода инструмента; $l_{\text{рез}}$, $t_{\text{рез}}$ – соответственно длина и время резания, а наработка между отказами, выраженная числом обработанных заготовок T_3

$$T_3 = \frac{T}{t_{\text{рез.д.}}},$$

где $t_{\text{рез.д.}}$ – время резания одной детали.

Зависимость среднего значения периода стойкости $\bar{T}$ от параметров режима резания принято называть стойкостной зависимостью [7]. В математической статистике зависимость такого типа называют уравнением регрессии. Вид этой зависимости определяется в процессе стойкостных испытаний. В литературе встречаются различные математические модели этой зависимости [7–11], причем каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Наибольшее распространение получила тейлоровская (степенная) зависимость, которая легла в основу действующих нормативов по расчету режимов резания:

$$T(v, s, h, HB) = \frac{C_h}{v^\mu s^x h^y HB^z} = \frac{C_T}{v^\mu}, \quad (1)$$

где v – скорость резания;
 s – подача;
 h – глубина резания;
 HB – твердость материала заготовки;
 C_h, μ, x, y, z – эмпирические константы,

$$C_T = \frac{C_h}{s^x h^y HB^z}.$$

Данные о коэффициентах стойкостной зависимости могут быть взяты из нормативов режимов резания или получены у производителя режущего инструмента. Имеются методики, позволяющие проводить оценку параметров стойкостной зависимости и закона распределения периода стойкости в производственных условиях.

Приводимые в нормативных и справочных данных таблицы скоростей резания для инструмента позволяют непосредственно определить необходимую для обработки заготовки из данного материала скорость резания V при заданном периоде стойкости инструмента T и, наоборот, заданный период стойкости T при заданной скорости V , если заданы следующие параметры: режим резания (глубина резания и подача), размеры инструмента, геометрические параметры режущего лезвия (главные углы, углы в плане и т. п.), предельное состояние лезвия режущего инструмента (по задней или передней поверхностям). Построение таблиц скоростей резания основано на стойкостной зависимости, которая вместе со значениями коэффициентов вариации периода стойкости инструмента непосредственно не приводятся в нормативах режимов резания.

Формулы стойкости инструмента и скорости резания действительны только в тех диапазонах используемых параметров, в которых показатели степени при этих величинах остаются неизменными и друг от друга не зависящими.

На самом деле показатели степени в стойкостной зависимости не являются постоянными, однако, с достаточной точностью эти показатели в литературе приняты постоянными для данного обрабатываемого материала, типа и материала инструмента. В современных условиях хозяйствования такие допущения становятся экономически невыгодными, поэтому остро встала проблема определения параметров стойкостной зависимости непосредственно в реальном производстве для конкретных условий обработки.

Ни одна из имеющихся в современной литературе стойкостных зависимостей не имеет убедительного физического обоснования. В узком диапазоне скоростей может быть использована любая из них при соответствующем подборе параметров. Очевидно, что, чем больше параметров имеет стойкостная зависимость, тем в более широком диапазоне она может аппроксимировать опытные данные. Но на практике существенное значение имеет простота использования стойкостной зависимости при оценке ее параметров в результате стойкостных испытаний, а также при определении оптимальной скорости резания.

С этой точки зрения степенная зависимость Тейлора обладает несомненными преимуществами, так как она линейна в логарифмических координатах, что облегчает оценку ее параметров, и для оптимальной скорости резания по критерию производительности или себестоимости получаются простые явные формулы. Именно поэтому в справочниках по нормативам режимов резания за основу взята именно степенная стойкостная зависимость.

Математическая модель

Однако период стойкости инструмента в общем случае является случайной функцией от параметров режимов резания, свойств обрабатываемого материала, геометрии и материала режущей части инструмента и других факторов, т. е.

$$T = T(v, s, h, HB, \dots).$$

При фиксированных значениях отмеченных параметров период стойкости инструмента является случайной величиной. Случайная величина считается заданной, если задан закон ее распределения. В данном случае – это *плотность распределения стойкости* $f(t)$ или *вероятность безотказной работы* $P(t)$ (функция надежности или вероятность того, что $T > t$). Вероятность безотказной работы инструмента определяется с помощью функции надежности

$$P\{T \geq t\} = P(t) = 1 - F(t), \quad (2)$$

где t – наработка инструмента, измеряемая временем резания.

В качестве частных характеристик случайной величины T чаще всего используют математическое ожидание периода стойкости:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} f(t)tdt = \int_0^{\infty} P(t)dt, \quad (3)$$

которое принято называть средней стойкостью, а в качестве меры разброса стойкости – коэффициент вариации

$$K_T = \sqrt{D_T / \bar{T}}, \quad (4)$$

где D_T – дисперсия случайной величины T :

$$D_T = 2 \int_0^{\infty} P(t)tdt - \bar{T}^2.$$

В качестве меры разброса используют также квадратичное отклонение σ_T :

$$\sigma_T = \sqrt{D_T}. \quad (5)$$

Коэффициент вариации периода стойкости как показатель ее стабильности имеет определенные преимущества перед среднеквадратичным отклонением. Единица измерения σ_T такая же, как и периода стойкости. Этот показатель, пригодный для оценки рассеяния периода стойкости при определенных неизменных условиях испытаний, не позволяет сравнивать между собой различные серии опытов, отличающиеся конструкцией инструмента, обрабатываемыми материалами, условиями работы и т. п. Коэффициент вариации периода стойкости зависит от условий эксплуатации: работа по корке или чистовая операция, режимы резания, качество изготовления инструмента и т. п. Как отмечает ряд исследователей, зависимость K_T от V отсутствует. Однако данные по этому вопросу являются разрозненными и нуждаются в дальнейшей проверке и подтверждении.

Для определения закона распределения существуют два подхода. Первый основан на подборе наиболее подходящей функции для описания эмпирического распределения. Такой подход возможен, но он обладает существенным недостатком, так как не отражает физической сущности закона распределения. Кроме этого, в большинстве случаев нет возможности провести необходимое число испытаний: различие между подбираемыми законами распределения наблюдается в "хвостах", а эту информацию получить экспериментальным путем крайне затруднительно. Поэтому функцию распределения приходится выбирать из формальных соображений.

Второй подход основан на установлении связи закона распределения с механизмом стохастического (случайного) процесса. В этом случае для описания распределения используют какой-либо теоретический закон распределения.

Износ инструмента $Y(t)$ после наработки t тоже является случайной величиной и как функция от t является случайным процессом [12]. Практически важные характеристики этого случайного процесса выражаются через плотность распределения износа $\phi_t(y)$ после наработки t .

Средний износ (математическое ожидание)

$$\bar{Y}(t) = \int_0^{\infty} \varphi_t(y) y dy. \quad (6)$$

Дисперсия износа

$$D_Y(t) = \int_0^{\infty} \varphi_t(y) [y - \bar{Y}(t)]^2 dy. \quad (7)$$

Коэффициент вариации износа

$$K_Y(t) = \sqrt{D_Y(t)} / \bar{Y}(t). \quad (8)$$

Наработка до износа $y = T(y)$ как случайная величина связана с $Y(t)$ следующим образом. Каждая реализация износа $Y(t)$, пересекающая уровень износа L после наработки $t = T$, пройдет ниже при $t = T$ уровня $y = L$. Эта ситуация иллюстрируется рисунком 1.

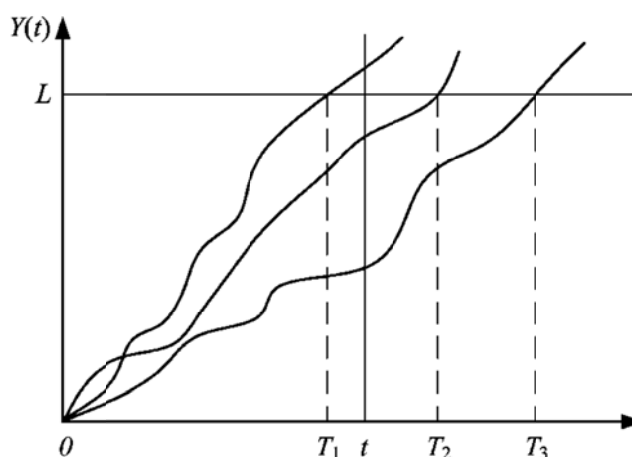


Рисунок 1 – Иллюстрация к выводу формул (3)–(6) T_1, T_2, T_3 – реализации периода стойкости

Отсюда вытекает, что вероятность того, что $Y(t) < L$ равна вероятности того, что $T(L) > t$, т. е.

$$P(Y(t) < L) = P(T(L) > t).$$

Если L – предельно допустимый износ, то отмеченная вероятность есть вероятность безотказной работы $P(t)$ в течение наработки t . Эта вероятность выражается через $\varphi_t(y)$ следующим образом:

$$P(t) = \int_0^L \varphi_t(y) dy. \quad (9)$$

Плотность распределения наработки на отказ

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = -\int_0^L \frac{d\varphi_t(y)}{dt} dy. \quad (10)$$

Средняя стойкость и другие характеристики выражаются через $P(t)$ и $f(t)$ по формулам (2)–(5).

Коэффициент вариации стойкости характеризует разброс периода стойкости и отражает как качество изготовления инструмента, так и условия его эксплуатации [13]. В работах Кацева П.Г., Высоковского Е.С., Топчего А.М., Краплина М.А. и других ученых получены экспериментальные данные, подтверждающие независимость коэффициента вариации периода стойкости от режима резания. Это не противоречит предположению Темчина Г.И. о том, что рассеивание фактических периодов стойкостей равносильно рассеиванию коэффициента C_T в стойкостной зависимости [14]. Данный факт подтвержден экспериментально Высоковским Е.С. [15].

При этом отказ режущего инструмента может быть двух типов: постепенным, из-за

износа лезвия, или внезапным, из-за разрушения лезвия. Интенсивность износа лезвия в свою очередь зависит от двух основных факторов:

- от параметров режущего инструмента (геометрии лезвия, износостойкости инструментального материала и др.);
- от условий работы (свойств обрабатываемого материала, величины припуска на обработку, режима резания, жесткости системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка» (СПИЗ) и др.

В зависимости от отмеченных факторов предлагаются следующие математические модели процесса износа и отказов режущего инструмента [16, 17].

1) **Веерная модель износа** основана на предположении, что решающим в разбросе периода стойкости есть вариабельность параметров режущего инструмента. В этом случае реализации износа расходятся в виде веера, отсюда и название модели,

$$Y(t) = U \cdot t,$$

где U – скорость (интенсивность) изнашивания, различная для различных экземпляров режущего инструмента.

Естественно, что чем больше скорость износа, тем меньше наработка T до износа L , то есть

$$T = L / U.$$

Если L – предельно допустимый износ, то T – период стойкости режущего инструмента или наработка до отказа. Превышение процессом $Y(t)$ величины износа L означает отказ режущего инструмента.

Интенсивность износа U то же является случайной величиной, интенсивность износа U будет иметь логнормальное распределение с плотностью

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_U u} \exp\left[-\frac{(\ln u - \ln \hat{U})^2}{2\delta_U^2}\right],$$

где $\hat{U}$ – медиана и среднее геометрическое значение интенсивности износа, δ_U – квадратичное отклонение логарифма интенсивности износа.

Математическое ожидание интенсивности износа

$$\bar{U} = \hat{U} \exp(\delta_U^2 / 2).$$

Стойкость T тоже имеет логнормальное распределение с параметрами $\hat{T}, \delta_T$, где $\hat{T} = L / \hat{U}$ – среднегеометрическая стойкость и медиана стойкости, а $\delta_T = \delta_U$.

Математическое ожидание и коэффициент вариации стойкости

$$\bar{T} = \hat{T} \cdot \exp(\delta_T^2 / 2), \quad K_T = \sqrt{\exp(\delta_T^2) - 1}.$$

Функция надежности (вероятность безотказной работы в течение наработки t)

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \Phi^*\left(\frac{\ln(t / \hat{T})}{\delta_T}\right),$$

где $\Phi^*(x)$ – функция распределения нормированной нормальной случайной величины.

2) **Модель накопления износа** основана на предположении, что разброс периода стойкости есть следствие вариабельности свойств заготовок (колебания припуска на обработку, твердости, вязкости и др.). Эти факторы остаются фиксированными на конкретной обрабатываемой детали и случайно изменяются при обработке следующей детали.

Износ режущего инструмента после обработки партии из M деталей равен сумме (накоплению) износов, полученных при обработке каждой детали партии, то есть

$$Y = \sum_{j=1}^M \Delta Y_j = t_r \sum_{j=1}^M U_j.$$

где t_r – время резания одной детали,

U_j – интенсивность износа при обработке j -й детали партии.

Суммарный износ Y как сумма случайных величин согласно теории вероятностей будет иметь асимптотически нормальное распределение с плотностью

$$\varphi_t(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t}} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma^2 t}\right].$$

Если наработка инструмента измеряется временем резания, то средний износ (математическое ожидание) после наработки t

$$\bar{Y}(t) = at = M \cdot t_r \cdot \bar{U},$$

где t_r – время резания,

$$t = M \cdot t_r, \quad a = \bar{U}.$$

Если наработка измеряется штуками обработанных деталей, то $t = M$, $a = t_r \cdot \bar{U}$. Таким образом, a – это средний износ за единицу наработки или средняя интенсивность износа по наработке. Параметр σ – это квадратичное отклонение износа за единицу наработки.

Вероятность безотказной работы в течение наработки t , то есть вероятность того, что $Y(t) < L$

$$P(t) \approx \int_{-\infty}^L \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t}} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma^2 t}\right] dy = \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma\sqrt{t}}\right).$$

3) **Комплексная модель износа** основана на предположении, что совместно действуют обе отмеченные группы факторов. Из-за разброса параметров режущего инструмента средняя интенсивность износа a при смене режущего инструмента изменяется в соответствии с некоторой плотностью распределения $\psi(a)$. Для конкретного режущего инструмента износ $Y_a(t)$ будет иметь асимптотически нормальное распределение с плотностью

$$\varphi_{at}(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t}} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma^2 t}\right]$$

как в модели накопления, где a – средняя интенсивность износа текущего режущего инструмента, σ^2 – дисперсия приращения износа на единицу наработки.

Вероятность безотказной работы в течение наработки t режущего инструмента со средней интенсивностью износа a $P_a(t)$ равна вероятности того, что $Y_a(t) < L$, то есть

$$P_a(t) = \int_0^L \varphi_{at}(y) dy \approx \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma\sqrt{t}}\right).$$

С учетом этого вероятность безотказной работы получается как рандомизация или смесь вероятности $P_a(t)$ по параметру a с плотностью $\psi(a)$. То есть

$$P(t) \approx \int_0^\infty \psi(a) P_a(t) da = \int_0^\infty \psi(a) \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma\sqrt{t}}\right) da.$$

Что касается явного определения плотности $\psi(a)$, то в этом случае следует использовать логнормальное распределение средней интенсивности a с плотностью

$$\psi(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta a}} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta^2}\right],$$

как в верной модели, где $\delta, \hat{a}$ – параметры распределения.

Таким образом, в комплексной модели износа режущего инструмента функция его надежности $P(t)$ зависит от трех параметров: $\hat{a}, \delta$ и σ , где $\hat{a}$ – среднегеометрическая интенсивность износа по всем инструментам; δ^2 – дисперсия логарифма интенсивностей износа по режущим инструментам, связанная с вариабельностью параметров режущих инструментов одной партии; σ^2 – дисперсия износа режущего инструмента за единицу наработки, связанная с вариабельностью твердости заготовок, разбросом величины припуска

на обработку, стохастическим характером самого процесса износа.

4) **Модель разрушения** основана на предположении, что режущий инструмент внезапно отказывает из-за разрушения (скола, выкрашивания, поломки) лезвия.

При этом предполагается, что изначально в лезвии имеются микродефекты, которые в процессе резания из-за колебаний силы резания постепенно развиваются в трещины с последующим его разрушением. Пусть $T_1, T_2, \dots, T_N$ время развития i -го микродефекта до критического размера, приводящего к разрушению лезвия. Но этих микродефектов много и фактическое разрушение лезвия наступит при

$$T = \min(T_1, T_2, \dots, T_N).$$

Предельным в такой модели для T является распределение Вейбулла. Плотность распределения и функция надежности в этом случае выражаются так:

$$f(t) = \frac{\beta}{r} \left(\frac{t}{r}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^\beta\right], \quad P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^\beta\right],$$

где r и β – параметры распределения.

5) **Обобщенная модель отказа** режущего инструмента учитывает совместное действие постепенного и внезапного отказов, то есть факторов износа и разрушения.

По данным Г.Л. Хаета доля отказов из-за разрушения при черновых и получистовых операциях доходит до 50 % и более. Так как последствия от этих отказов могут быть различными, то при определении показателей надежности режущего инструмента следует учитывать тип отказа.

Если T'_1 – наработка между отказами по причине износа, T'_2 – наработка до отказа по причине разрушения, то фактическая наработка до отказа по любой причине (период стойкости)

$$T = \min(T'_1, T'_2),$$

а вероятность безотказной работы в течение наработки t (обобщенная функция надежности), то есть вероятность того, что $T \geq t$

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t),$$

где $P_1(t)$ – функция надежности по износу,

$P_2(t)$ – функция надежности по разрушению лезвия.

Обобщенная функция надежности

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_0^\infty \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta^2}\right] \cdot \Phi^*\left(\frac{L - at}{\sigma\sqrt{t}}\right) da \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^\beta\right]$$

имеет 5 параметров: $\hat{a}, \sigma, \delta, r, \beta$.

При $\sigma \rightarrow 0$ и $1/r \rightarrow 0$ в пределе получаем веерную модель износа, при которой функция надежности подчиняется логнормальному закону, при $\delta \rightarrow 0$ и $1/r \rightarrow 0$ в пределе получаем модель накопления, при $\hat{a} \rightarrow 0$ и $\sigma \rightarrow 0$ в пределе получаем чистую модель разрушения, при которой $P(t) = P_2(t)$, а при $1/r \rightarrow 0$ в пределе получаем комплексную модель износа, при которой $P(t) = P_1(t)$.

Методика оптимизации

Период стойкости из-за разброса режущих свойств отдельных инструментов одной партии и из-за разброса свойств обрабатываемости заготовок (твердости, припуска на обработку и др.) является случайной величиной с некоторой плотностью распределения $f(t)$. Для оптимизации режима резания необходимо знать как эту плотность, так и зависимость параметров плотности от параметров режима резания (скорости резания V , подачи S , глубины резания h и др.). В дальнейшем под режущим инструментом будем понимать прежде всего резец и токарную обработку, хотя результаты могут быть применены и для других видов инструментов с учетом специфики оценки износа.

В качестве плотности $f(t)$ для веерной модели износа предложено использовать логнормальное распределение, для модели разрушения – распределение Вейбулла, для модели накопления – распределение, связанное с нормальным распределением износа. Для комплексной и обобщенной модели предложена соответствующая комбинация отмеченных распределений.

В качестве критерия оптимальности примем удельные затраты, то есть затраты, связанные с заменой резца и возможным браком при работе отказавшим резцом,

приходящиеся на одну обработанную деталь [18]. Рассмотрим два варианта режима замены.

При первом варианте резец заменяется после g_p обработанных деталей или после t_p времени резания. Если $t_{рез}$ – время резания одной детали, то $t_p = g_p \cdot t_{рез}$. Удельные затраты Θ в этом случае выражаются так:

$$\Theta(V, S, h, g_p) = \frac{Z_o + Z_b + Z_p}{g_p}. \quad (11)$$

Здесь Z_o – затраты на собственно обработку за период g_p , Z_p – средние затраты, связанные с одной заменой резца. Z_b – средние затраты, связанные с исправлением или заменой возможного брака за время обработки g_p деталей.

При втором варианте за состоянием инструмента ведется контроль и замена выполняется по достижению нормативно установленного предельного износа L . Удельные затраты в этом случае зависят только от режима резания и выражаются так:

$$\Theta(V, S, h) = \frac{Z_o + Z_k + Z_p}{\bar{g}}, \quad (12)$$

где $\bar{g}$ – средний период стойкости в штуках обработанных деталей,

Z_k – затраты на контроль состояния инструмента за этот период.

В этом случае предполагается, что из-за контроля за износом резца брак из-за несвоевременной замены резца отсутствует и компонента затрат $Z_b = 0$ и поэтому в (12) отсутствует.

Для вычисления Z_b в первом варианте и $\bar{g}$ во втором варианте необходимо использовать данные о надежности резца. Если t – наработка резца в единицах времени резания, то вероятность безотказной работы в течение наработки t

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt, \quad (13)$$

а средний период стойкости в минутах времени резания

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} f(t) t dt = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Средний период стойкости в штуках обработанных деталей

$$\bar{g} = \bar{T} / t_{рез}$$

Среднее время безотказной работы за период по наработке t_p

$$\bar{T}_p = \int_0^{t_p} P(t) dt$$

и среднее время работы отказавшим (затупившимся) резцом за тот же период

$$\bar{\tau} = t_p - \bar{T}_p. \quad (14)$$

Затраты из-за брака пропорциональны числу обработанных деталей за время $\bar{\tau}$, то есть

$$Z_b = \bar{\tau} / t_{рез} \cdot C_b, \quad (15)$$

где C_b – средние затраты из-за брака одной детали.

Время резания зависит от режима резания. Например, при точении вала диаметром D на дине l с подачей S

$$t_{рез} = \frac{c_v}{V}, \quad c_v = \frac{\pi D l}{1000 S}. \quad (16)$$

Затраты Z_p определяются так:

$$Z_p = t_{зам} \cdot C_{см} + C_{и} / n_p. \quad (17)$$

Здесь $t_{зам}$ – средние затраты времени связанные с заменой инструмента, $C_{см}$ – себестоимость станкоминутой. $C_{и}$ – цена инструмента, n_p – число переточек. При сменной

режущей пластине $C_{\text{и}}$ – цена пластины, а n_p – число режущих граней. Если Θ – удельные затраты времени, то $Z_p = t_{\text{зам}}$. Если критерий оптимальности – удельные затраты времени, то $C_b = c$, а если затраты в рублях, то $C_b = c \cdot C_{\text{см}}$, где c – средние затраты времени на брак одной детали на данном технологическом переходе.

Затраты Z_o пропорциональны g_p и поэтому $Z_o = t_{\text{рез}} \cdot g_p$ или $Z_o = t_{\text{рез}} \cdot g_p \cdot C_{\text{см}}$ в зависимости от варианта измерения затрат.

Затраты Z_k пропорциональны периоду стойкости, то есть $Z_k = \bar{g} \cdot C_k$ в минутах или $Z_k = \bar{g} \cdot C_k \cdot C_{\text{см}}$ в рублях.

Если исходить только из удельных затрат времени, то оптимальные значения V и g_p дают наибольшую производительность, а если исходить из затрат в рублях, то получаем минимум себестоимости.

Удельные затраты Θ с увеличением подачи S и глубины резания h убывают и поэтому при оптимизации их следует брать исходя из технологических и других ограничений по максимуму. Например, подачу следует назначать исходя из требуемой шероховатости обработки, а глубину резания – исходя из величины припуска на обработку с учетом максимальной мощности привода главного движения. Что касается скорости резания, то в области технологических и конструктивных ограничений станка обычно находится оптимальная скорость резания, сводящая к минимуму удельные затраты.

Поиск оптимальных значений V и g_p может выполняться различными методами. В данной работе в ниже рассматриваемом примере использовался метод перебора значений V, g_p с малым шагом. Такой метод прост при программировании в связи с возможной многоэкстремальностью функции $\Theta(V, g_p)$.

Математическое моделирование

Приведем некоторые результаты, полученные с использованием отмеченной методики при следующих исходных данных:

- коэффициент вариации интенсивности износа по резцам 0,3;
- коэффициент вариации износа на деталь 1,0;
- предельный износ 0,4 мм;
- подача, 0,15 мм/об;
- глубина резания 0,35 мм;
- твердость по Бринеллю 150;
- длина обработки 100 мм;
- диаметр обработки 50 мм;
- затраты на исправление брака детали 20 мин;
- затраты на контроль износа на деталь 0,5 мин;
- затраты на замену инструмента и подналадку 5 мин;
- стоимость станкоминуты 100 руб.;
- стоимость режущей пластины 300 руб.;
- число режущих граней пластины 4.

График зависимости среднего периода стойкости от скорости резания $\bar{T}(V)$ при таких исходных данных приведен на рисунке 2. Особенность зависимости $\bar{T}(V)$ в том, что она горбообразна. Максимум периода стойкости достигается при $V = 70$ м/мин, в то время как скорости резания, обеспечивающие экономически эффективный период стойкости, обычно имеют большие значения.

На рисунке 3 приведены графики зависимости удельных затрат от скорости резания для трех компонент затрат и в целом при оптимальном периоде замены g_p для каждой скорости как на рисунке 4. Удельные затраты в целом $\Theta = \Theta_o + \Theta_b + \Theta_p$, а компоненты затрат $\Theta_o = Z_o / g_p$, $\Theta_b = Z_b / g_p$, $\Theta_p = Z_p / g_p$.

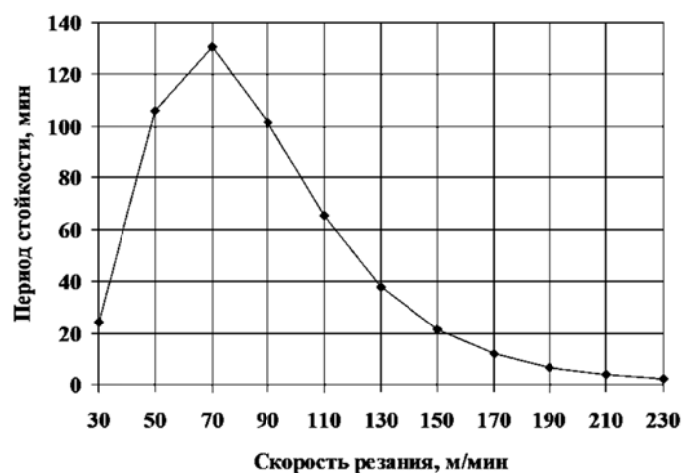


Рисунок 2 – Зависимость среднего периода стойкости от скорости резания

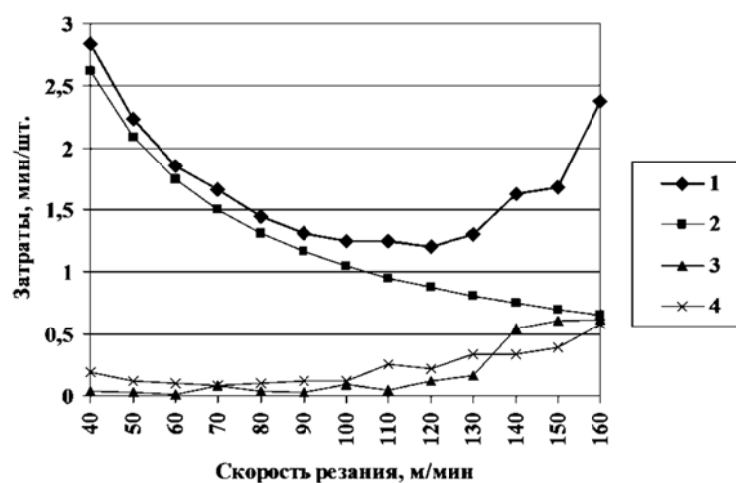


Рисунок 3 – Зависимость удельных затрат от скорости резания при оптимальном периоде замены инструмента:

1 – $\Theta(V)$ – общие затраты, 2 – $\Theta_o(V)$ – затраты на обработку, 3 – $\Theta_b(V)$ – затраты на исправление или замену брака, 4 – $\Theta_p(V)$ – затраты, связанные с заменой инструмента.

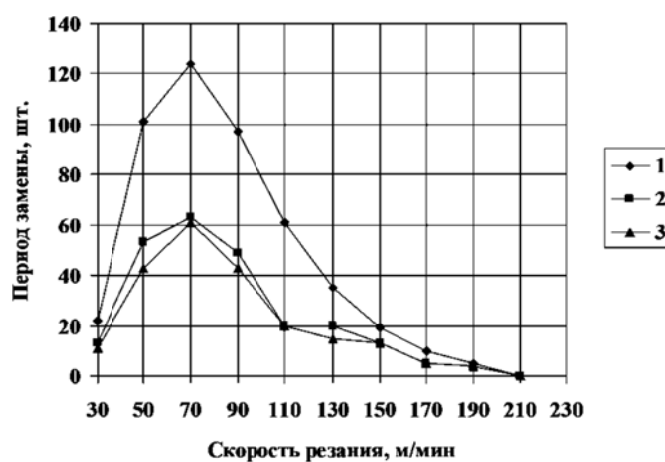


Рисунок 4 – Зависимость оптимального периода замены инструмента от скорости резания при различных значениях коэффициентов вариации K_u и k_a :

1 – $K_u = 0, k_a = 0$; 2 – $K_u = 0.3, k_a = 0$; 3 – $K_u = 0.3, k_a = 1.0$

Заключение

Результаты расчета, представленные на рисунках 3 и 4, показывают, что управление надежностью режущего инструмента с учетом фактора случайности позволяет существенно повысить производительность и экономичность процесса резания. За счет правильного выбора скорости резания и периода замены инструмента удельные затраты удастся снизить на 65 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиваченко Л.А. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики / Л.А. Сиваченко, Т.Л. Сиваченко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 254 с.
2. Бушуев В.В. Направления развития мирового станкостроения / В.В. Бушуев, Ф.С. Сабилов // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – №. 1. – С. 24–30.
3. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting / V.P. Astakhov. – London: Elsevier, 2006. – 392 p.
4. Астахов В.П. Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием / В.П. Астахов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №. 8–1. – С. 141–153.
5. Мартинов Г.М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г.М. Мартинов, А.С. Григорьев // СТИН. – 2012. – №12. – С. 23–27.
6. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий: ГОСТ 25751–83. – Введ. 1984–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 27 с.
7. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / А.М. Гильман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.
8. Бобров В.Ф. Оптимизация режима резания при точении / В.Ф. Бобров, Э.С. Спиридонов // СТИН. – 1980. – №10. – С. 22–23.
9. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник для машиностроит. и приборостроит. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
10. Режимы резания металлов: справочник / Ю.В. Барановский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 408 с.
11. Бондарев А.А. Математический аппарат прогнозирования стойкости лезвий режущего инструмента при токарной обработке с предварительной пластической деформацией / Бондарев А.А. [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19. – № 4 (70). – С. 16–20.
12. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев [и др.]; под. ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.
13. Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
14. Темчин Г.И. Многоинструментальные наладки. Теория и расчет / Г.И. Темчин. – М.: Машгиз, 1963. – 443 с.
15. Высоковский Е.С. Влияние скорости резания на надежность твердосплавных резцов / Е.С. Высоковский, А.М. Топчий // Надежность режущего инструмента. – Киев: Техника, 1972.
16. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 174 с.
17. N.I. Pasko The generalized mathematical model of the failure of the cutting tool / Pasko N.I. [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – 177. – 012052. DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012052.
18. Пасько Н.И. Оптимизация планово-предупредительной замены режущего инструмента по данным об износе и наработке / Н.И. Пасько, А.В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Вып. 5–2. – С. 257–265.

Анцев Александр Витальевич

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Технология машиностроения»
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел. (4872) 25–46–48
E-mail: a.antsev@yandex.ru

RELIABILITY MANAGEMENT OF THE CUTTING TOOL CONSIDERING RANDOMNESS FACTOR OF CUTTING PROCESS

Abstract. *The reliability management of the cutting tool consist of actions aimed at changing the tool parameters, characteristics and machining conditions. The machining conditions include, for example, the material to be processed, technological equipment, the cutting regime, the order of maintenance and repair. To manage the reliability of the cutting tool, a mathematical model is proposed that takes into account the randomness factors of the cutting process. The randomness factors of the cutting process are: the dispersion of the cutting properties of the tool; the dispersion of the parameters of the blanks and the possibility of destruction of the cutting edge of the tool. As a criterion of optimality in the optimization of cutting regimes, it is proposed to use reduced costs. Reduced costs include processing costs, the costs of restoring the cutting tool, and the costs of rejecting the blank or monitoring the cutting tool. A numerical illustration is given of reliability management of a cutting tool, taking into account the randomness factor of the cutting process. Reliability management of the cutting tool with the proposed model will reduce the reduced costs of the cutting process by 65 %.*

Keywords: *reliability management, cutting tools, stochastic model, reduced cost, cutting regimes, optimization.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sivachenko L.A. Tekhnologicheskoye mashinostroyeniye – innovatsionnyy rezerv mirovoy ekonomiki / L.A. Sivachenko, T.L. Sivachenko. – Mogilev: Belarus.–Ros. un–t, 2017. – 254 s.
2. Bushuyev V.V. Napravleniya razvitiya mirovogo stankostroyeniya / V.V. Bushuyev, F.S. Sabirov // Vestnik MGTU Stankin. – 2010. – №. 1. – S. 24–30.
3. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting / V.P. Astakhov. – London: Elsevier, 2006. – 392 p.
4. Astakhov V.P. Printsip naimenshey energii plasticheskoy deformatsii pri razrushenii kak osnova ponimaniya i optimizatsii obrabotki metallov rezaniyem / V.P. Astakhov // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2016. – №. 8–1. – S. 141–153.
5. Martinov G.M. Diagnostirovaniye rezhushchikh instrumentov i prognozirovaniye ikh ostatochnoy stoykosti na stankakh s CHPU v protsesse obrabotki / G.M. Martinov, A.S. Grigoryev // STIN. – 2012. – №12. – S. 23–27.
6. Instrumenty rezhushchiye. Terminy i opredeleniya obshchikh ponyatiy: GOST 25751–83. – Vved. 1984–01–01. – M.: Izdatelstvo standartov, 1983. – 27 s.
7. Optimizatsiya rezhimov obrabotki na metallorezhushchikh stankakh / A.M. Gilman [i dr.]. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 188 s.
8. Bobrov V.F. Optimizatsiya rezhima rezaniya pri tochenii / V.F. Bobrov, E.S. Spiridonov // STIN. – 1980. – №10. – S. 22–23.
9. Granovskiy G.I. Rezaniye metallov: uchebnik dlya mashinostroit. i priborostroit. vuzov / G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy. – M.: Vyssh. shk., 1985. – 304 s.
10. Rezhimy rezaniya metallov: spravochnik / YU.V. Baranovskiy [i dr.]. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 408 s.
11. Bondarev A.A. Matematicheskii apparat prognozirovaniya stoykosti lezviy rezhushchego instrumenta pri tokarnoy obrabotke s predvaritelnoy plasticheskoy deformatsiyey / Bondarev A.A. [i dr.] // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – T. 19. – № 4 (70). – S. 16–20.
12. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva / S.N. Grigoryev [i dr.]; pod. red. S.N. Grigoryeva. – M.: Mashinostroyeniye, 2011. – 600 s.
13. Bashkov V.M. Ispytaniya rezhushchego instrumenta na stoykost / V.M. Bashkov, P.G. Katsev. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 136 s.
14. Temchin G.I. Mnogoinstrumentalnyye naladki. Teoriya i raschet / G.I. Temchin. – M.: Mashgiz, 1963. – 443 s.
15. Vysokovskiy Ye.S. Vliyaniye skorosti rezaniya na nadezhnost tverdosplavnykh reztsov / Ye.S. Vysokovskiy, A.M. Topchiy // Nadezhnost rezhushchego instrumenta. – Kiyev: Tekhnika, 1972.
16. Obobshchennaya stokhasticheskaya model otkazov rezhushchego instrumenta i yeye primeneniye / N.I. Pasko [i dr.]. – Tula: Izd-vo TulGU, 2016. – 174 s.
17. N.I. Pasko The generalized mathematical model of the failure of the cutting tool / Pasko N.I. [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – 177. – 012052. DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012052.
18. Pasko N.I. Optimizatsiya planovo–predupreditelnoy zameny rezhushchego instrumenta po dannym ob iznose i narabotke / N.I. Pasko, A.V. Antsev // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2015. – Vyp. 5–2. – S. 257–265.

Antsev Alexander Vitalievich

FSBEE of HE «Tula State University»

Candidate of Technical Sciences, docent, docent of

«Technology of Mechanical Engineering» department

300012, Tula, pr. Lenina, 92

Ph. (4872) 25–46–48

E-mail: a.antsev@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТАКАНОВ С КОНИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ЧАСТЬЮ

Аннотация. В статье проанализированы различные возможные варианты протекания процесса комбинированного выдавливания стаканов с конической донной частью, математическое рассмотрение которых необходимо для успешного решения общей вариационной задачи описания данного процесса. Изложены результаты предварительных экспериментов, подтверждающие высокую эффективность предлагаемого способа выдавливания.

Ключевые слова: объемная штамповка, металлический стакан с конической донной частью, комбинированное выдавливание.

Введение

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что полые изделия типа стаканов с конической донной частью в многомиллионных количествах используются в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оборонной промышленности (рисунок 1, 2 [1, 2]). Традиционно подобные изделия в настоящее время получают путём последовательного применения к исходной цилиндрической заготовке (рисунок 3–а) калибровки с формовкой, во время которых окончательно образуют наружный конический участок донной части изделия (рисунок 3–б) и последующего обратного выдавливания стакана с внутренней полостью требуемой геометрии (рисунок 3–в) [3].



Рисунок 1 – Примеры известных боевых снарядов НАТО



Рисунок 2 – Корпуса крупнокалиберных авиационных разрывных пуль

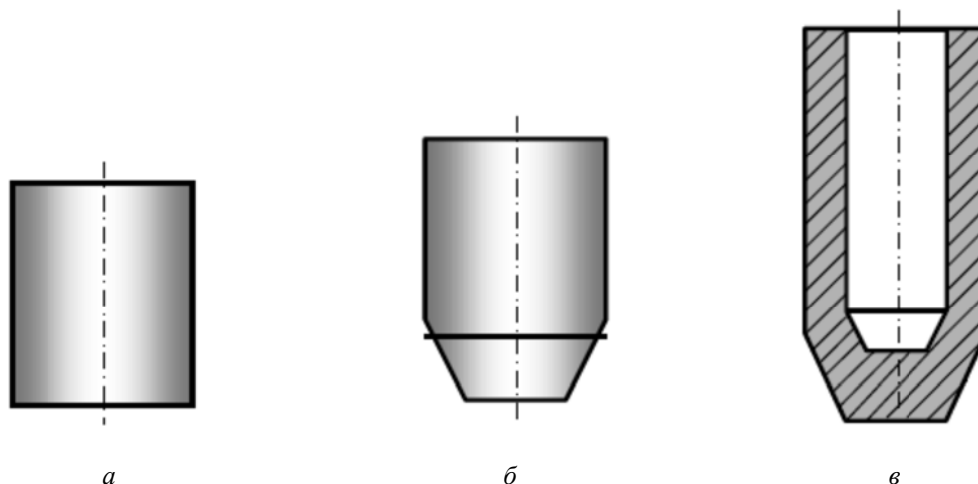


Рисунок 3 – Традиционная технология выдавливания стаканов с конической донной частью:
а – исходная заготовка; б – заготовка после калибровки с формовкой; в – выдавленный стакан

Наилучшим с точки зрения облегчения автоматизации процесса, получения высоких размерной точности и чистоты поверхности, упрочнения материала изделия, а также повышения коэффициента использования металла является холодное выдавливание. Однако его применение зачастую сдерживается необходимостью создания высоких деформирующих сил, а также высокими удельными деформирующими силами, действующими на пуансон, и давлениями, действующими на матрицу. Это, соответственно, приводит к необходимости покупки дополнительных прессов и изготовления значительного количества дополнительного штампового инструмента, а также увеличивает общие энергетические и финансовые затраты.

Исследовательская часть

Между тем, в настоящее время остро стоит задача снижения энергетических затрат и расхода металла, а также повышения производительности и качества при производстве таких изделий, которая, на наш взгляд, может быть решена путём применения комбинированного выдавливания.

В книгах [6, 7] указано, что «комбинированным выдавливанием называется выдавливание, при котором одновременно выполняется несколько операций. При таком выдавливании металл имеет несколько направлений течения, что приводит к снижению удельной силы по сравнению с традиционным выдавливанием». Применительно к рассматриваемым нами изделиям, комбинированное выдавливание можно реализовать по схеме, показанной на рисунке 4, отличительной особенностью которой является совмещение формовки конического дна с выдавливанием полости стакана. В этом случае металл имеет возможность одновременного течения не только в образующую стенку, но и в коническую донную часть изделия.

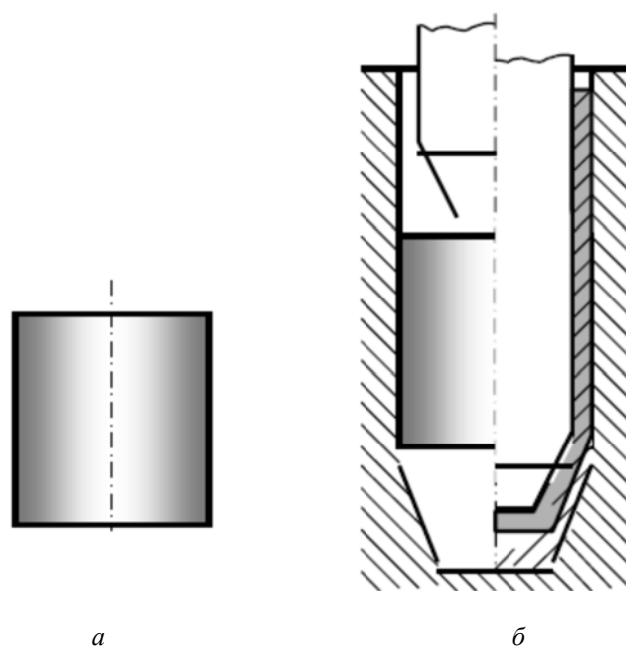


Рисунок 4 – Предлагаемая технология выдавливания стаканов с конической донной частью:
а – исходная заготовка; б – выдавливание

Проведённое изучение состояния вопроса показывает, что ни экспериментальное, ни теоретическое изучение комбинированного выдавливания стаканов с коническим дном по схеме на рисунок 4 в известных работах ранее не проводилось [3–11]. Поэтому углублённое исследование данного процесса с целью создания научно обоснованной методики его успешного проектирования является актуальным.

Несмотря на кажущуюся простоту данного процесса пластической деформации, показанного на рисунок 4, на самом деле его механико–математическое описание представляет собой исключительно сложную вариационную задачу, поскольку в

зависимости от высоты исходной заготовки, соотношения наибольших рабочих радиусов пуансона и матрицы, формы донной части матрицы и формы рабочего торца пуансона (рисунок 5), а также коэффициентов трения реальное пластическое течение может происходить очень разнообразно. При этом итоговый вид получаемых изделий может отличаться мало, либо не отличаться совсем.

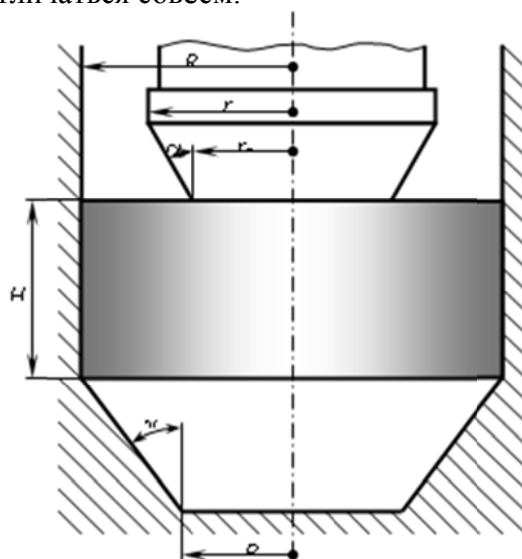


Рисунок 5 – Геометрические параметры выдавливания:

H_0 – начальная высота заготовки; r – радиус калибрующего пояса пуансона; r_0 – наименьший радиус рабочего торца пуансон; α – угол конусности пуансона; R – радиус цилиндрической части полости матрицы; R_0 – наименьший радиус донной части матрицы; γ – угол конусности донной части матрицы

Возможные варианты протекания процесса представлены на рисунке 6.

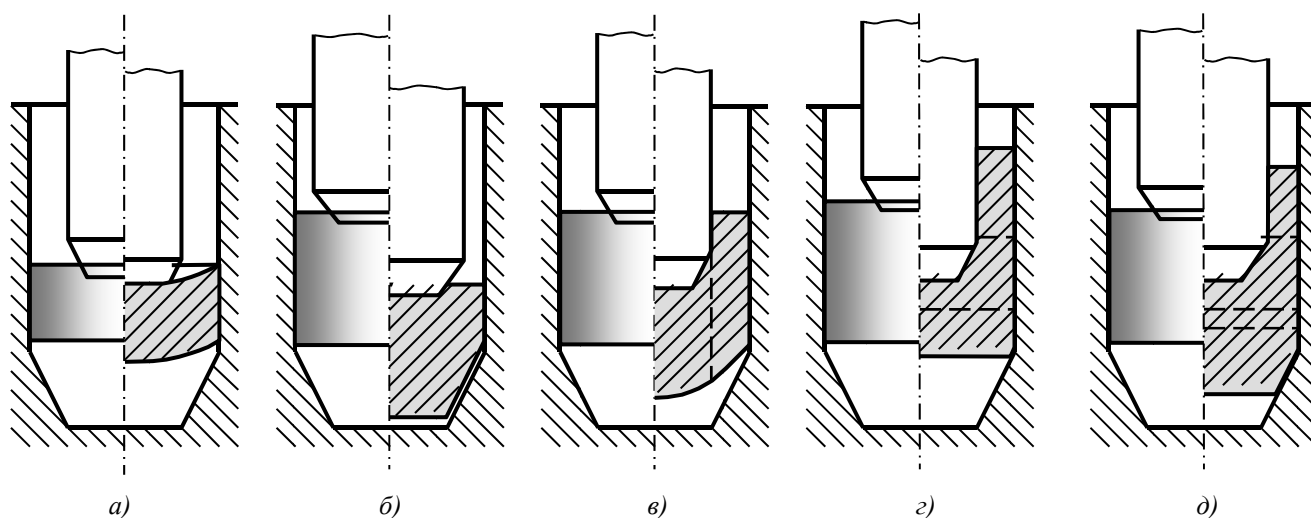


Рисунок 6 – Возможные варианты протекания процесса пластической деформации

Самым интересным и значимым для исследования является случай одновременного обратного выдавливания верхней полости и прямого выдавливания нижней конической части заготовки (рисунок 6–д). Здесь возможны два варианта протекания процесса: 1) когда верхний и нижний очаги пластической деформации отделены друг от друга промежуточной жёсткой областью; 2) когда верхний и нижний очаги пластической деформации соприкасаются друг с другом. Математически наиболее сложным для теоретического описания является второй случай, поскольку, если в первом случае высоты верхнего и нижнего очагов определяются независимо друг от друга условиями минимума сил верхнего

и нижнего процессов пластической деформации, то во втором случае положение общей границы раздела пластического течения вверх и вниз придётся искать из общего условия минимума всей энергии пластической деформации.

Так как любые научные теории всегда строятся на тех или иных предположениях и допущениях, то есть обязательно упрощают реальные природные явления, то для подтверждения достоверности и точности выведенных формул и разработанных методик теоретического расчёта обязательно необходима их тщательная экспериментальная проверка. Для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях был разработан и изготовлен специальный штамп, принципиальная схема которого представлена на рисунок 7. Сначала для подтверждения возможности снижения силы предлагаемым способом были проведены сравнительные эксперименты на заготовках из свинца С00 (по 5 образцов в каждой серии испытаний). Эксперименты проводились на гидравлическом прессе ПГ65, снабжённом тарированной месдозой для замера силы и датчиком перемещения, соединённых с компьютером.

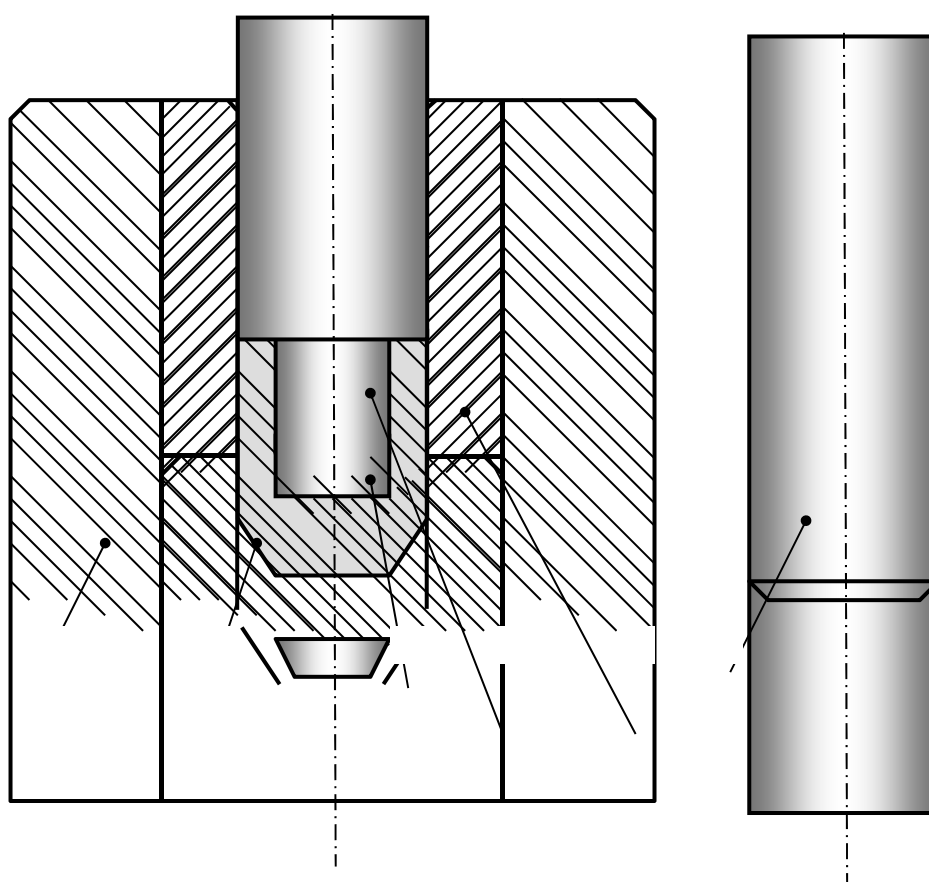


Рисунок 10 – Экспериментальный штамп:

1 – бандаж; 2 – матрица; 3 – донный вкладыш; 4 – пуансон; 5 – заготовка; 6 – выталкиватель

Результаты исследований

Была получена силовая диаграмма предлагаемого выдавливания, рассмотрим характерные участки данной диаграммы (рисунок 9): На участке ОА происходит внедрение конического торца пуансона в заготовку и одновременно начинается заполнение конической полости дна матрицы. При рабочем ходе, соответствующем точке А, торец пуансона полностью внедряется в заготовку, после чего наступает квазистационарная стадия выдавливания АВ. Поскольку на данной стадии вследствие интенсивного заполнения конической полости матрицы происходит преимущественное перемещение материала заготовки вниз, то это вызывает соответствующее перемещение вниз верхней части

заготовки, в результате чего в зоне контакта очага пластической деформации с матрицей возникают активные силы трения, снижающие силу выдавливания на 30% по сравнению с традиционным выдавливанием (кривая 1). По мере заполнения конической полости матрицы перемещение материала заготовки вниз замедляется, в результате чего силы трения между верхней частью заготовки и матрицей постепенно меняют направление и становятся реактивными, что вызывает соответствующий рост силы выдавливания на участке БВ. Точка В соответствует моменту полного заполнения донной части матрицы и переходу выдавливания в традиционное с той же силой, что и на кривой 1. В точке Г очаг пластической деформации касается своей нижней границей дна матрицы, вследствие чего начинается эффект дна с соответствующим падением силы на 7–10%. Если продолжить выдавливание после точки Д, то сила вновь начнёт повышаться.

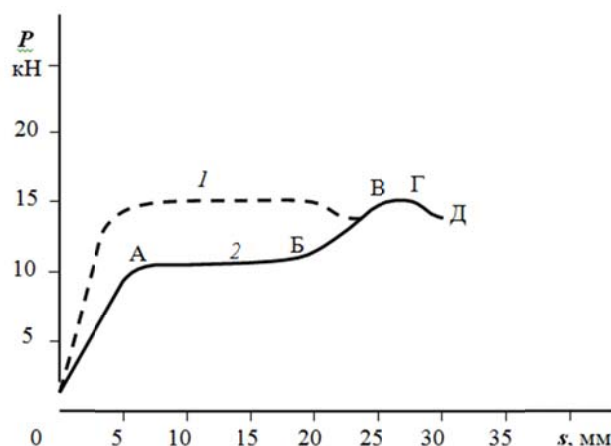


Рисунок 9 – Сопоставительные диаграммы изменения силы P по ходу выдавливания s :
 1 – кривая изменения силы традиционного выдавливания; 2 – кривая изменения силы предлагаемого выдавливания

Выводы

Таким образом, проведённые предварительные эксперименты убедительно доказывают большую эффективность предлагаемого способа выдавливания и обуславливают целесообразность проведения дальнейших углублённых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин Д. Н. История советского стрелкового оружия и патронов. С.–П.: Полигон. 1995. 303 с.
2. Волковский Н. Л. Энциклопедия современного оружия и боевой техники. Том 2. С.–П.: Полигон. 1997. 582 с.
3. Холодная объёмная штамповка. Справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. М.: Машиностроение. 1973. 496 с.
4. Фельдман Г. Д. Холодное выдавливание стальных деталей. М.: Машгиз. 1963. 188 с.
5. Ковка и штамповка. Справочник / Под ред. Е. И. Семенова.
6. Воронцов А. Л. Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение. 2004. 721 с.
7. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. Том 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 441 с.
8. А.с. № 1238877 (СССР), МКИ В 21 К 21/00. Способ изготовления деталей типа стаканов и устройство для его осуществления / Воронцов А.Л. Оpubл. 23.06.86, Бюл. № 23.
9. Отечественное развитие и решение проблемы штамповки полых деталей цилиндрической формы, имеющих конический придонный участок / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев, А.Ю. Аксененко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 10. Ч. 2. 2014. С. 3–18.
10. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение. 1983. 200 с.
11. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.

Воронцов Андрей Львович

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: avorontsov55@mail.ru

Тялина Дарья Александровна

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
магистрант 1-го курса, кафедра «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: daria.tyalina@mail.ru

A.L. VORONTSOV, D.A. TYALINA

**THE STUDY OF THE COMBINED EXTRUSION OF GLASSES
WITH A CONICAL BOTTOM PART**

Abstract. *The article analyzes various possible process variants of combined extrusion of glasses with conical bottom part. Mathematical consideration of these variants is necessary for the successful solution of the general variational problem of this process description. The results of preliminary experiments confirming the high efficiency of the proposed extrusion method are presented in article.*

Keywords: *die forging, a metal cup with a conical bottom part, combined extrusion.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bolotin D.N. Istoriyasovetskogostrelkovogooruzhiya I patronov. S.–P.: Polygon. 1995. 303 p.
2. Volkovskiy N.L. InciklopediyasovremennogooruzhiyaIboyevoitechniki. Part 2. S.–P.: Polygon. 1997. 582 p.
3. Navrockiy G.A. Holodnayzobyemnyashtampovka. M.: Mashinostroenie. 1973. 496 p.
4. Feldman G.D. Holodnoyevidavlivaniestalnyhdetaley. M.: Mashgiz. 1963. 188 p.
5. Semenov E.I. Kovkaishtampovka
6. Voroncov A. L. Teoriyashtampovkivydavlivaniem. M.: Mashinostroenie. 2004. 721 p.
7. Voroncov A. L. Teoriyairaschetyprocessovobrabotkimetallovdavleniem. Part 1. M.: BMSTU. 2014. 396 p.
8. Voroncov A. L. Sposobizgotovleniyadetaleytipastakanov I ustroystvodlya ego osushestvleniya. Copyright certificate № 1238877 (USSR).
9. Dmitriev A.M. Korobova N.V. Tolmachev N.S. Aksenenko A.Y. Otechestvennoyerazvitiye I resheniye problem shtampovkipolyhdetaleycilindricheskoyformy, imeyushihkonicheskiypridonniyuchastok. IzvestiyaTulskogogosudarstvennogouniversiteta. Technicheskiiyenuki№ 10 part 2 2014 3–8 p.
10. Ovchinnikov A.G. Osnovyteoriiishtampovkivydavlivaniemnapressah. M.: Mashinostroenie. 1983. 200 p.
11. Storozhev M.V. Popov E.A. Teoriyaobrabotkimetallovdavleniem. M.: Mashinostroenie. 1977. 423 p.

Voroncov Andrey Lvovich

Bauman Moscow State Technical University
Doctor of Tech. Science, Professor of Department
«Technology of material working»
105005, Moscow, 2-yaBaumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: avorontsov55@mail.ru

Tyalina Daria Aleksandrovna

Bauman Moscow State Technical University
Student of Department «Technology of material working»
105005, Moscow, 2-yaBaumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: daria.tyalina@mail.ru

А.А. МУХАМЕДЗЯНОВА, Н.Ю. БЕЙЛИНА

О СОЗДАНИИ В РОССИИ ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЯНЫХ КОКСОВ И ПЕКОВ – ПРЕКУРСОРОВ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Представлены результаты анализа литературных данных по состоянию производства, технологии получения, рынка сбыта и потребления углеродных композиционных и конструкционных материалов. Отмечено, что производство пеков и кокса – прекурсоров углеродных материалов – из нефтяного сырья в настоящее время налажено и интенсивно развивается рядом зарубежных фирм. Показаны преимущества использования нефтяных пеков и коксов по сравнению с каменноугольными. Отмечены предпосылки создания производства пеков и коксов из остаточных продуктов нефтепереработки и нефтехимии в России. Описана технология получения средне- и высокотемпературных связующих, пропиточных и волокнообразующих пеков. Приведена принципиальная технологическая схема установки получения пеков и кокса из тяжелой смолы пиролиза производительностью по смоле 31000 тонн/год.*

Ключевые слова: *тяжелая пиролизическая смола, среднее и высокотемпературное связывание, пропитка и волокноформовая смола, кокс, углеродные конструкционные и композиционные материалы, технология получения.*

Введение

Углеродные композиционные и конструкционные материалы (УККМ) относятся к классу высокотемпературных материалов с непревзойденными абсолютными и удельными характеристиками плотности, прочности, тепло- и электропроводности при высоких температурах. Они обладают такими уникальными свойствами как небольшая удельная масса, химическая и биологическая инертность, устойчивость к действию радиации и высокая сорбционная активность, не подвержены старению при хранении, легко поддаются механической обработке. УККМ применяют в аэрокосмической технике, энергетике, строительстве, самолето-, автомобиле- и приборостроении[1].

УККМ различного назначения по способу получения, составу и микроструктуре являются материалами, содержащими карбонизованные или графитированные наполнитель (основу) и (или) матрицу из карбонизирующегося и спекающегося связующего и представляют собой карбонизованную или графитированную углеродную композицию. Наполнителем в графитовых материалах является малозольный и низкосернистый специальный кокс (из нефтяных, каменноугольных или сланцевых смол).

Основная часть

Для производства искусственных графитовых материалов применяются высокотемпературные технологии, позволяющие из аморфного сырья обработкой органических веществ при температурах выше 2500°C получить углерод в виде аллотропной модификации графита в изделиях с высокой прочностью, плотностью и радиационной стабильностью. Традиционная технология получения углеродных материалов состоит в следующем: измельченный прокаленный кокс (наполнитель) смешивают с пеком (связующим), полученную коксо-пековую композицию повторно измельчают и прессуют при высоких давлениях 40–70 МПа, полученные заготовки обжигают при 1300°C и графитируют при 2600–3000 °C, при необходимости дополнительно пропитывают пеком (импрегнатом). Меняя виды используемого сырья: коксов, пеков и технологию изготовления, возможно в широких пределах изменять текстуру, физико-химические, теплофизические и эксплуатационные свойства искусственных графитов и ассортимент изделий [2]. Источниками сырья для получения УККМ являются продукты переработки нефти, каменноугольной смолы и сланцев.

Каменноугольные пекии коксы являются кубовыми остатками периодической и непрерывной дистилляции каменноугольных смол коксохимического производства. Нефтяные пеки получают методом термополиконденсации без давления и под давлением 4–5 атм, пеки из сланцевых смол – окислением первичной смолы с дальнейшей термополиконденсацией. Применение сланцевого сырья повышает чистоту кокса связующего по золе, сере, азоту, позволяет варьировать структуру коксового остатка. В последнее время набирает популярность синтез пеков с получением молекул заданной

структуры с фрагментами из пяти–семи ароматических колец. Синтез связующих позволяет направленно формировать структуру и свойства матрицы УМ, снижать содержание зольных примесей и азота.

К преимуществам каменноугольного сырья относятся высокий выход кокса, низкая зольность и низкая сернистость, высокая спекающая способность и невысокая вязкость при температурах в два раза превышающих температуру размягчения, к недостаткам – высокое содержание азота. Нефтяные и сланцевые пеки выгодно отличаются от каменноугольных низким содержанием азота, пониженной зольностью и невысоким содержанием нерастворимых в хиолине фракций, но для них характерны повышенная вязкость. Сланцевые пеки являются лучшими импрегнатами для УККМ и электродов.

В отечественных технологиях получения УККМ в качестве связующих и пропиточных традиционно используют каменноугольные пеки. Сырьем для получения пеков служит каменноугольная смола, являющаяся одним из продуктов коксования угольной шихты на коксохимических заводах. В середине 90–х годов качество каменноугольной смолы, получаемой на предприятиях стран СНГ, несколько ухудшилось, и не соответствует нормам санитарно–гигиенических условий его переработки. Это связано с нарушениями поставок коксующегося угля и нестабильным качеством перерабатываемой угольной шихты.

В СССР производство УККМ специального назначения базировалось на использовании кокса марки КНПС–СМ (ГОСТ 22898–78) и каменноугольных пеков. В бывшем СССР коксохимические мощности были особенно сильно развиты в РФ и на Украине. Производство кокса было организовано на Московском опытно–промышленном заводе ВНИИ НП, Горьковском и Волгоградском НПЗ, но в 90–х годах оно было прекращено. В настоящее время устойчивого обеспечения отраслей промышленности коксом нет, дефицит отечественного сырья по некоторым видам углеродных материалов составляет от 50 до 100% и покрывается импортом. Импорт в Российскую Федерацию в 2016, 2017 гг. составил: пеков – 15000–20000 т/год из Германии, Польши, Бельгии и Чехии и кокса типа КНПС – СМ – 25000–40000 т/год из Азербайджана, Туркмении, Румынии и Эстонии на общую таможенную стоимость до 5 млрд. рублей.

Кроме того, в настоящее время резко повысились требования к качеству углеродных материалов и санитарно–гигиеническим условиям, связанным с получением и переработкой углеродных материалов. По статистическим данным качество пеков на базе каменноугольных смол постоянно снижается, что связано с интенсификацией процессов коксования углей и неоптимальным составом угольных шихт. Каменноугольные пеки отличаются довольно высоким содержанием бензапирена (1,2–4%), что обуславливает их канцерогенную активность [2]. Поэтому в мировой практике известны попытки перевода предприятий на использование нефтяных пеков, которые обладают более низким содержанием канцерогенных веществ.

Положительный опыт применения нефтяных пеков имеется в США, Канаде, Японии и Франции. В 90–ых гг. на предприятиях Днепропетровский электродный завод и Иркутский алюминиевый завод испытания промышленных партий нефтяных пеков фирмы «Ашланд петролеум» с температурой размягчения 65 °С и 105 °С прошли с положительными результатами. В то же время на ОАО «НУНПЗ» была реализована в опытно–промышленных масштабах технология производства нефтяного пека из крекингového сырья. Годовая выработка пека достигала 20 тыс. т. Пек почти полностью в течение 6 лет потреблял Братский алюминиевый завод. Промышленные партии этого пека были испытаны на Саянском алюминиевом и Новосибирском электродном заводах, Челябинском электрометаллургическом комбинате. Потребители признали целесообразность применения нефтяного пека в смеси с каменноугольным. Замена каменноугольного пека на нефтяной в цветной металлургии позволяет снизить вредные выбросы на производстве, сократить содержание канцерогенов в воздухе рабочей зоны, улучшить санитарно–гигиенические условия работы персонала металлургического производства, получить высококачественное углеродное сырье для электродного производства с постоянными физико–химическими свойствами и групповым составом [3].

По заключению ОАО «НИИГрафит» использование нефтяных пеков в производстве УККМ позволяет обеспечить качество изделий на уровне продукции, изготовленной на основе каменноугольных пеков. Применение высокоплавких пеков и нефтяных спекающих добавок связано с их способностью к карбонизации с достаточно высоким выходом

углеродного остатка с требуемым качеством. Углеродный остаток выполняет наполняющие, уплотняющие, связующие и спекающие функции или используется как целевой продукт. В процессе карбонизации пеки выполняют также порообразующие функции. Известны направления использования высокоплавких пеков без карбонизации, где они используются как наполняющие, уплотняющие, связующие, стабилизирующие, изолирующие компоненты.

При исследовании физико–химических процессов взаимодействия пеков с коксами различной природы установлена и обоснована возможность широкого применения нефтяных пеков вместо каменноугольных при одновременном улучшении качества продукции. Испытание опытных партий нефтяных пиролизных пеков показало, что их применение в качестве связующего и импрегнатов позволяет получить графиты марок МГ–1, ВПГ соответствующие, а по некоторым показателям превышающие характеристики серийного материала. Для всех материалов, пропитанных нефтяными пеками, характерны повышенные пределы прочности при испытаниях на изгиб и лучший модуль упругости, чем при пропитке каменноугольным пеком. Использование пиролизного пека в качестве связующего позволило существенно увеличить плотность и прочность мелкозернистых графитов на основе прокаленного кокса и получить материалы на основе непрокаленного кокса с пониженным температурным коэффициентом линейного расширения повышенной теплопроводностью, соответствующей теплопроводности среднезернистых графитов. Такое сочетание свойств предполагает применение материала в изделиях с эксплуатацией в условиях больших перепадов температур. Известны данные о принципиальной возможности применения нефтяных пеков для производства материалов антифрикционного назначения [4].

В зависимости от области применения пеки подразделяют на: 1) связующие, применяемые при изготовлении самообжигающихся или обожженных анодов, графитированных электродов, электроугольных изделий и конструкционных материалов на основе графита; 2) пропитывающие; 3) брикетные – связующие для частичного брикетирования углей перед их коксованием, литейных коксобрикетов, коксобрикетов для цветной металлургии; 4) волокнообразующие для производства углеродных графитированных волокон; 5) специальные для производства наноматериалов; 6) сырьё для коксования (рисунок 1).

В любой области применения нефтяные пеки конкурируют с пеками из другого природного сырья, прежде всего с каменноугольными, отличаясь от них более высокой реакционной способностью в термохимических процессах, меньшей канцерогенностью и другими преимуществами. Пеки с температурой размягчения 180...250 °С и коксуемостью 60...80% используют как сырьё для производства углеродных волокон и микросфер, антифрикционных углеродных материалов, формованного кокса и как спекающие добавки к каменным углям при получении металлургического кокса. Ещё более высокоплавкие пеки (полукоксы) с выходом летучих 14...20% находят применение в производстве электроэрозионного графита.

Замена каменноугольных пеков нефтяными приводит к сокращению технологического цикла, экономии тепло– и энергоресурсов, улучшению экологической обстановки на заводах–производителях углеродной продукции за счет исключения из производственного цикла каменноугольных канцерогенных составляющих и расширению сырьевой базы промышленности углеродных конструкционных и углерод–углеродных композиционных материалов.

Именно этим обусловлено увеличение в настоящее время доли пекового сырья в мире (примерно до 30). В США, Японии, Англии, Франции, Китае и других странах с развитой нефтепереработкой фундаментальные и прикладные исследования в области производства нефтяных пеков проводятся на протяжении 45 лет с привлечением научно–исследовательских структур университетов, вооруженных сил, нефтехимических, коксохимических и металлургических компаний. В результате в этих странах налажено промышленное производство и применение нефтяных пеков широкого ассортимента [5].

В РФ и СНГ в настоящее время нет действующих, строящихся и спроектированных промышленных установок получения нефтяных пеков, хотя имеются все предпосылки его создания:

1) значительные сырьевые ресурсы – высокоароматичные остаточные продукты нефтепереработки, которые в настоящее время используют в качестве компонентов

котельного топлива или продают иностранным нефтехимическим компаниям; 2) производственные мощности нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий – т.к. для производства нефтяных пеков и волокон на их основе не нужно строить новые заводы, достаточно специальных пилотных установок и линий; 3) проектно–конструкторская база; 4) центры подготовки соответствующих специалистов – ведущие технические ВУЗы республики; 5) научно–технический потенциал.

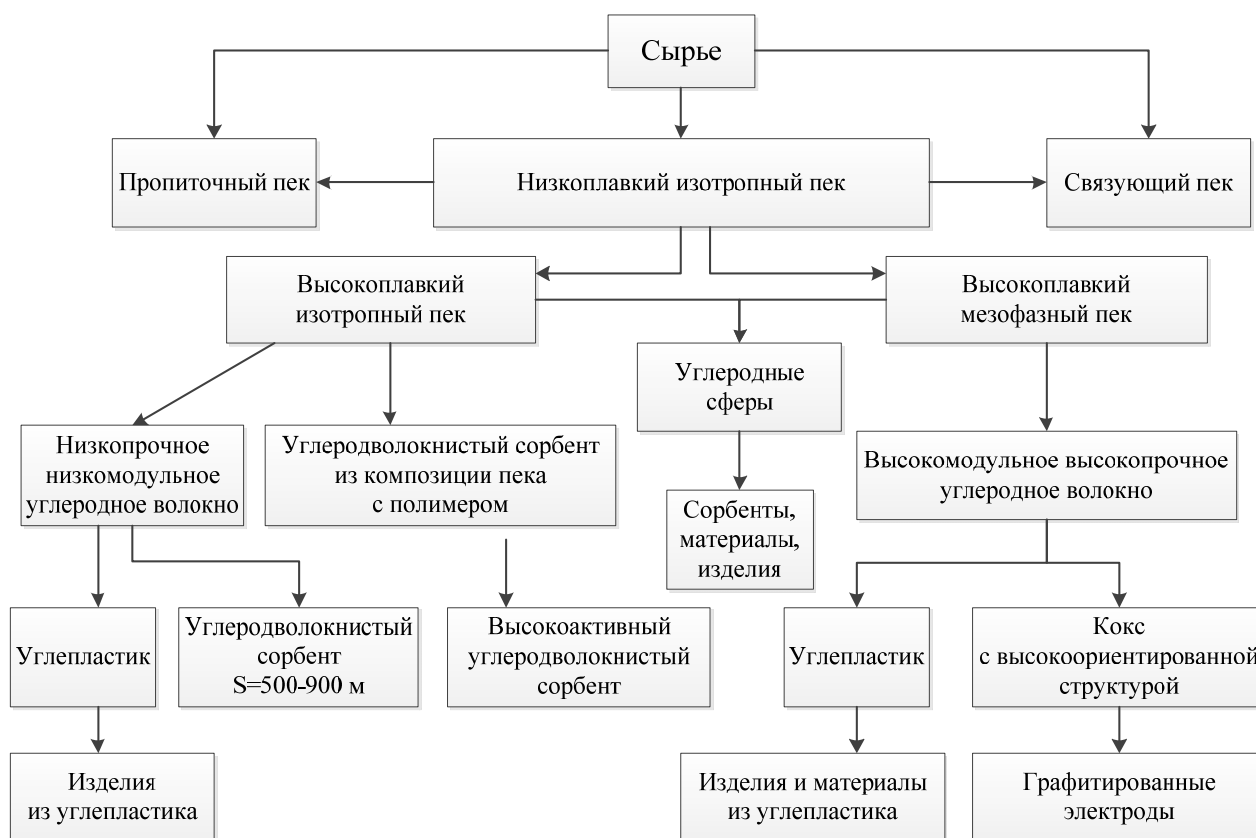


Рисунок 1 – Виды пеков и изделия на их основе

Комплексная разработка технологии получения нефтяных пеков была начата в 70–ые годы прошлого столетия (Уфимский нефтяной институт, Башкирский научно–исследовательский институт нефтехимпереработки, НИИГрафит, НПО «Химволокно», НИИ НП, МИНХ и ГП, ВНИИ СВ, ГосНИИЭП, СибВАМИ, Салаватский и Томский нефтехимические комбинаты, Ново–Уфимский нефтеперерабатывающий завод). На опытном заводе Салаватского нефтехимического комбината была построена и с 1977 по 1980 г. эксплуатировалась для наработки опытных партий пилотная установка получения пека на основе тяжелых смол пиролиза. В период с 1973 по 1990 гг. для наработки опытных партий пеков и испытаний разработанных в УНИ и МИНХиГП способов их получения использовались пилотные установки Уфимского опытного завода БашНИИ НП, предназначенные для деасфальтизации и замедленного коксования нефтяных остатков. В 90–ых гг. БашНИИ НП располагал несколькими пилотных установок получения и наработки опытных партий пеков: ЗК–1, ТК–9, ТК–10. Процесс термообработки проводили в жидкофазных реакторах вытеснения непрерывного действия при температурах 280–360°C под давлением 1,00–1,35 МПа. Испытания опытных образцов полученных на опытно–промышленной установке нефтяных пиролизных пеков были проведены на экспериментальной базе институтов НИИГрафит, СибВАМИ и НПО «Химволокно» и показали, что данные нефтяные пеки могут быть использованы в производстве искусственного графита, анодной массы и углеродных волокон. Нефтяные волокнообразующие пеки, полученные на пилотной установке ТК–10 ГУП «ИНХП РБ» из смол пиролиза, были испытаны в качестве сырья для получения углеродных мононитей. Карбонизацией пековых волокон были получены углеродные мононити с прочностью на разрыв 400–1400 МПа, модулем Юнга около 6000 МПа и плотностью 1,59–1,67 г/см³ при

выходе 80–86: на исходный пек. Испытаниями установлена также возможность получения нетканого холста, состоящего из углеродных волокон со средним диаметром 7–10 мкм и прочностью на разрыв до 1000 МПа. Разработана технология производства композиций пека с поликапроамидом. Полученные композиции переработаны в углеродно-волоконистый сорбент с хорошо развитой поверхностью 1100 м²/г, большой емкостью 0,4–0,7 г/г, полнотой десорбции 97% и неизменными свойствами в течение 20 циклов, рекомендованный для извлечения углеводородов всех классов с температурой кипения до 250°C и их смесей из паро-воздушного потока.

В настоящее время в Башкирском государственном университете совместно с учеными Уфимского государственного нефтяного технического университета разработана технология получения нефтяных связующих, пропиточных и волокнообразующих пеков и кокса специального назначения[6]. В результате экспериментов

- установлен режим карбонизации ТСП, исключающий образование карбоидов в реакционной массе: температура 340–380 °С, давление 0,1–0,7 МПа, продолжительность изотермической стадии до 10 ч.;

- определены предельные концентрации превращения асфальтенов в карбены 36–42% масс., карбенов в сферолиты мезофазы – 36–39% масс.;

- обнаружена корреляционная зависимость между концентрацией карбенов в пеке и выходом мезофазы. Обращение или инверсия фаз наблюдалось при содержании мезофазы 88–92% масс.

Методом флуоресцентной спектроскопии впервые установлено, что основными мезогенными компонентами нефтяных пиролизных пеков являются полиароматические соединения, содержащие четыре–пять конденсированных бензольных колец.

Установленные закономерности легли в основу способа получения высокоплавких анизотропных пеков. Полученные пеки содержали мезофазу в количестве 50–80% об., имели температуру размягчения 200–240 °С, обладали достаточно высокой пластичностью и были термически стабильны при температурах формования 250–350°C, т.е. пригодны для формования волокон.

Испытание волокнообразующих свойств пеков из ТСП показало, что большинство из них при 230–260 °С обладали способностью образовывать из расплава непрерывные нити диаметром 20–36 мкм, максимальная скорость вытягивания нити достигала 6,5–10,6 м/с при степени фильерной вытяжки – 183500:1. Свежесформованные волокна хорошо окислялись воздухом при нагревании до 300 °С и при окислении характеризовались незначительной объемной усадкой. Установлены оптимальные температурные режимы формования пеков. По данным рентгеноструктурного анализа упорядочение структуры пеков приводит к улучшению формуемости, окисляемости и прочности волокон.

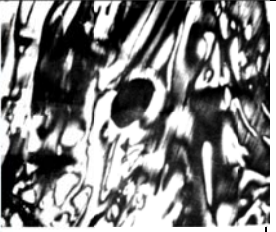
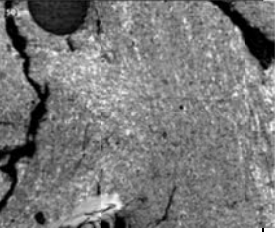
Для выделения мезофазы (до 100%) из карбонизирующейся массы предложены и исследованы: 1) метод отстаивания при 300–380°C и 2) экстракции изотропной части толуолом или *n*-гептаном в сверхкритических для растворителя условиях (330–340°C, 10МПа, продолжительность четыре часа). Полученные концентраты мезофазы относительно тугоплавки: температура размягчения – 290–310° и в размягченном или расплавленном состоянии (при 350°C) обладали способностью к формованию. Концентраты мезофазы, выделенные с помощью экстракции, отличаются большей плотностью, высокими значениями коксуемости и температуры размягчения. Степень анизотропии оптической структуры остатков экстракции составляет ~100%, т.е. они практически полностью состоят из жидких кристаллов. Результатом выполненных работ являются разработанные и запатентованные способы получения высокоплавких пеков.

Таким образом, на сегодняшний день разработаны физико-химические основы технологии получения пеков из нефтяного сырья различного назначения. Установлены закономерности фазовых переходов высокомолекулярных компонентов, протекающих при термообработке и экстракции растворителями нефтяных остатков. Технология опробована в масштабах лабораторных и пилотной установок.

В 2015 г. по инициативе АО «НИИГрафит» начата работа над проектом по созданию комплексного, импортозамещающего производства пеков и коксов – сырья для производства специальных углеродных конструкционных и композиционных материалов – на площадке Акционерного общества «Салаватский химический завод». В настоящее время выполнены технико-экономическое обоснование проекта, исходные данные для проектирования, бизнес–

план проекта. Продуктами установки являются средне- и высокотемпературные связующие и пропиточные пеки, мезофазные волокнообразующие пеки и кокс типа КНПС–СМ (таблица 1).

Таблица 1 – Продукты опытно–промышленной установки получения нефтяных пеков и кокса специального назначения

Наименование продукта	Пек связующий средне–температурный	Пек связующий высоко–температурный	Пек мезофазный	Кокс КНПС
Внешний вид				
Нормативный документ	ТУ 48–4807–287–94	ТУ 48–4807–287–94	Проект СТО	ГОСТ 22898–78

Принципиальная блочная схема установки получения нефтяных пеков и коксов специального назначения представлена на рисунке 2.

В качестве сырья установки предложена тяжелая смола пиролиза – остаточный продукт производства этилена. ТСП с установки ЭП–340 поступает на фильтрацию при 200°C для очистки от механических примесей и далее в ректификационную колонну для разделения на фракции с н.к. до 230 °C и 230°C и выше. Углеводороды с температурой кипения ниже 230°C (их в исходной ТСП около 30%) направляют на производство ракетного топлива или технического нафталина, фракцию с температурой кипения выше 230°C, или мягкий пек, разделяют на два потока. Первый направляют на получение нефтяных пеков, второй – кокса КНПС–СМ. Кокс КНПС–СМ получают коксованием в кубах стабильной суспензии мягкого пека с мелкодисперсным техническим углеродом. Другой поток мягкого пека поступает в реакторы для формирования средне- и высокотемпературных пеков. Основным процессом получения пеков является термообработка мягкого пека при температуре 320–400 °C и давлении до 1,35 МПа. При движении сырья наблюдается накопление высокомолекулярных компонентов, возрастание плотности, коксуемости, температуры размягчения и ароматичности продуктов.

Мезофазный пек получают из высокотемпературного связующего в две стадии. На первой проводят его термообработку в среде растворителя с высокой ароматичностью – дистиллятной фракции с н.к. выше 350°C, которая образуется на предыдущих стадиях процесса. Растворитель играет роль дисперсионной среды, поставщика мезогенных компонентов и теплоносителя, который можно нагревать в трубчатой печи до относительно высоких температур (540–560 °C). На второй стадии проводят физико–химическое и химическое концентрирование жидкокристаллической фазы до ее содержания от 55 до 100 % об. Образующиеся в процессе летучие собирают и направляют в блок переработки дистиллятов для выделения товарных тяжелого и легкого газойлей, углеводородных газов и бензина.

Разработанный процесс получения пеков и кокса специального назначения является полунепрерывным, а особенности технологической схемы и аппаратного оформления обеспечивают достаточно высокую гибкость установки для обеспечения условий формирования нефтяных пеков различного назначения и изменения качества и природы сырья. В частности, особенности конструктивного оформления и системы обогрева реакторов позволяют в широких пределах варьировать температурным профилем потока реакционной массы по длине реактора, давлением, объемом реакционной зоны и производительностью установки соответственно природе сырья и задачам получения пека необходимого качества.

Проведена предварительная оценка экономической эффективности технологической линии по переработке 21000 т/год тяжелой смолы пиролиза (таблица 2).

Технология получения связующих, пропиточных и волокнообразующих нефтяных пеков и кокса КНПС–СМ из остатков нефтепереработки защищены патентами РФ на изобретения.

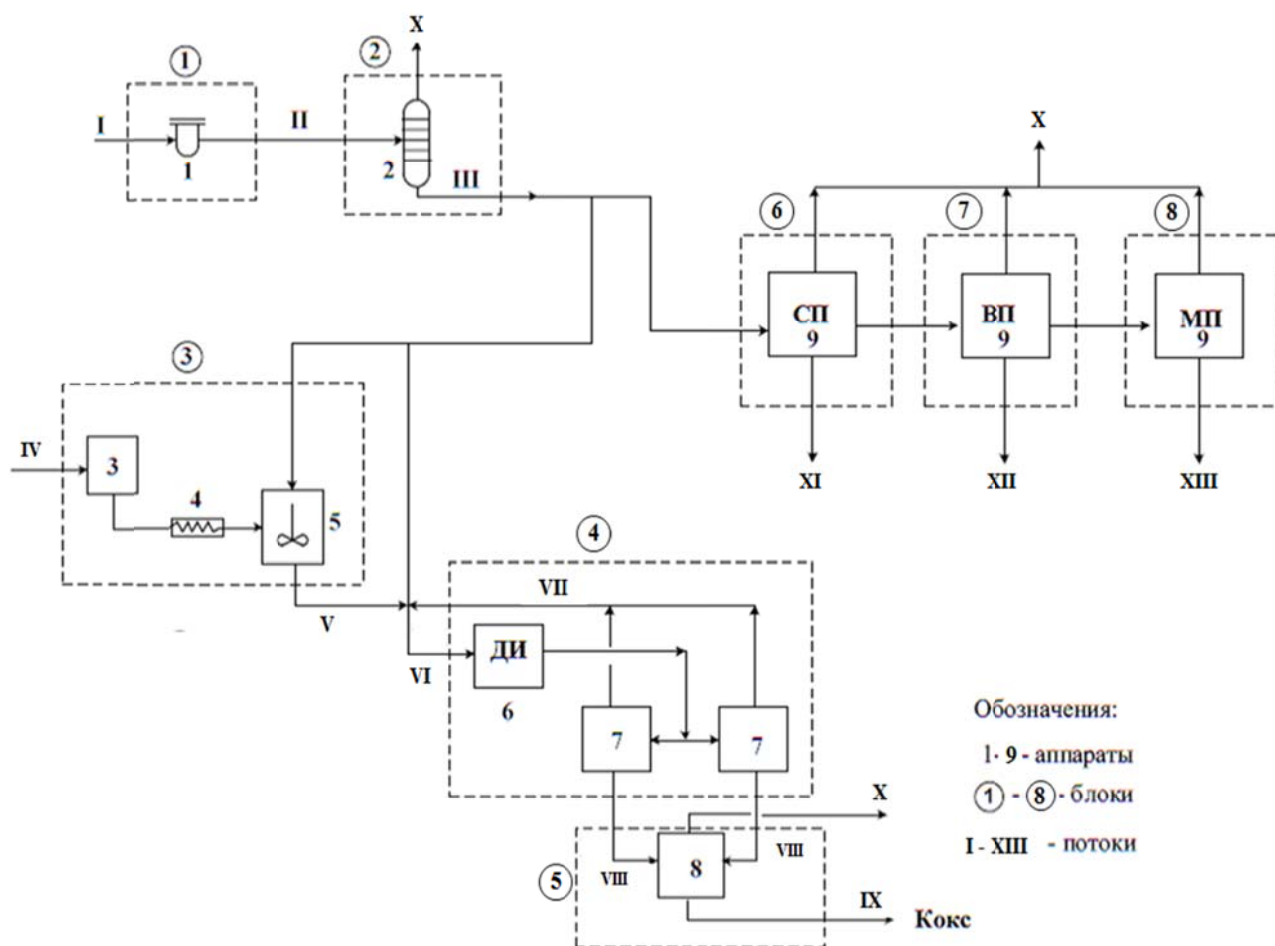


Рисунок 2 – Принципиальная блочная схема установки получения нефтяных пеков и коксов специального назначения:

Аппараты: 1 – фильтр тонкой очистки; 2 – фракционирующая колонна;

3 – буферная емкость технического углерода; 4 – дозатор; 5 – емкость предварительного смешения и приготовления суспензии; 6 – дезинтегратор – диспергатор; 7 – емкость сырья коксования;

8 – коксовые кубы; 9 – реакторы получения пеков.

Блоки: 1 – блок очистки исходной смолы; 2 – блок фракционирования; 3 – блок получения модифицированного пека; 4 – блок гомогенизации и стабилизации; 5 – блок коксования; 6 – блок получения среднетемпературного пека; 7 – блок получения высокотемпературного пека; 8 – блок получения мезофазного пека

Потоки: I – исходная ТСП; II – очищенная ТСП; III – мягкий пек; IV – мелкодисперсный углерод;

V – суспензия углерода в мягком пек; VI – поток суспензии на диспергирование и гомогенизацию;

VII – рециркулирующий диспергирующий поток; VIII – загрузка куба коксования; IX – кокс КНПС;

X – газ и дистиллят на блок фракционирования; XI – среднетемпературный пек;

XII – высокотемпературный пек; XIII – мезофазный пек

Таблица 2 – Финансово-экономические показатели проекта строительства опытно-промышленной установки получения нефтяных пеков и кокса специального назначения

Показатели эффективности проекта	Значение показателя
Инвестиции в проект, млн. руб.	1144,1
Чистая приведённая стоимость, млн. руб.	974,36
Внутренняя норма доходности, %	55,88 %
Индекс доходности дисконтированных инвестиций	2,84
Срок окупаемости, лет	5,22
Срок окупаемости с учётом дисконтирования, лет	5,80

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский О. Б. Мировая нефтехимическая промышленность. М. Наука. 2003. 556 с.

2. Островский В.С., Бейлина Н.Ю., Липкина Н.В., Синельников Л.З. Пековый кокс как наполнитель конструкционных графитов // Химия твердого топлива. – 1995, – № 1. – С. 56–61.
3. Хайрудинов И.Р., Ахметов М.М., Теляшев Э.Г. Состояние и перспективы развития производства кокса и пека из нефтяного сырья // Рос.хим. журнал (Журнал российского химического общества им. Д. И. Менделеева). 2006. Т. 1, с. 45–57
4. Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М., Селина Е.А. Тенденции развития производства связующего для анодовалюминиевых электролизеров, Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies, т. 7, 2012, № 5, р. 752–759
5. Мухамедзянова А. А., Мухамедзянов А. Т., Гимаев Р. Н., Хайбуллин А. А. Получение пластичных анизотропных пеков из продуктов термообработки тяжелой смолы пиролиза. Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. Вып. 8, с. 1203–1207
6. Мухамедзянова А.А., Гимаев Р.Н., Хайбуллин А.А. Технология получения нефтяных волокнообразующих пеков, Уфа: Гилем, 2012, 256 с.

Мухамедзянова Альфия Ахметовна
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»;
докт. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой
технической химии и материаловедения;
450077, г.Уфа, ул. Мингажева, д.100;
Тел.: +7-347-228-62-55;
E-mail: alf6058@yandex.ru

Бейлина Наталия Юрьевна;
Акционерное общество "Научно-исследовательский
институт конструкционных материалов на основе
графита "НИИГрафит";
докт. техн. наук, профессор, научный руководитель;
111524, г. Москва, ул. Электродная, д.2;
+7(495)672-72-77;

A.A. MUKHAMEDZIANOVA

ABOUT CREATION IN RUSSIA PRODUCTIONS OIL COKE AND PITCHES – PRECURSORS CARBON COMPOSITE MATERIALS

Abstract. Results of the analysis of literary data on a condition of production, technology of receiving, sales market and consumption of carbon composite and constructional materials are presented. It is noted that production of pitches and coke – precursors of carbon materials – from oil raw materials is adjusted now and intensively develops a number of foreign firms. Advantages of use of oil pitches and coke in comparison with coal are shown. Prerequisites of creation of production of pitches and coke from residual products of oil processing and petrochemistry in Russia are noted. The technology of receiving average and high-temperature binding, impregnating and fibreform pitches is described. The process flow diagram of installation of receiving pitches and coke from heavy pitch of pyrolysis by productivity on pitch of 31000 tons/year is provided.

Keywords: heavy pyrolysis tar, average and high-temperature binding, impregnating and fibreform petroleum pitches, coke, carbon constructional and composite materials, technology of receiving.

BIBLIOGRAPHY

1. Braginskiy O. B. Mirovaya neftekhimicheskaya promyshlennost. M. Nauka. 2003. 556 s.
2. Ostrovskiy B.C., Beylina N.YU., Lipkina N.V., Sinelnikov L.Z. Pekovyy koks kak napolnitel konstruktсионnykh grafitov // Khimiya tverdogo topliva. – 1995, – № 1. – S. 56–61.
3. Khayrudinov I.R., Akhmetov M.M., Telyashev E.G. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya proizvodstva koksa i peka iz nefyanogo syr'ya // Ros.khim. zhurnal (Zhurnal rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva). 2006. T. 1, s. 45–57
4. Vershinina Ye.P., Gildebrandt E.M., Selina Ye.A. Tendentsii razvitiya proizvodstva svyazuyushchego dlya anodovalyuminiyevykh elektrolizerov, Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies, т. 7, 2012, № 5, р. 752–759
5. Mukhamedzyanova A. A., Mukhamedzyanov A. T., Gimayev R. N., Khaybullin A. A. Polucheniye plastichnykh anizotropnykh pekov iz produktov termoobrabotki tyazheloy smoly piroliza. Zhurnal prikladnoy khimii. 2015. T. 88. Vyp. 8, s. 1203–1207
6. Mukhamedzyanova A.A., Gimayev R.N., Khaybullin A.A. Tekhnologiya polucheniya neftyanykh voloknoobrazuyushchikh pekov, Ufa: Gilem, 2012, 256 s.

Mukhamedzyanova Alfya Akhmetovna;
FSBEEHE "The Bashkir state university";
Doctor of Engineering, associate professor,
manager of department of technical chemistry and
materials science;
450077, Ufa, Mingazhevst., 100;
Tel: +7-347-228-62-55;
E-mail: alf6058@yandex.ru

Beilina Natalia Yurievna;
Joint stock company "Research Institute of Graphite-
Based structural Materials NIIGrafit";
Doctor of Engineering, Professor, scientific Director;
111524, Moscow, Elektrodnyast., 2;
Tel.: +7(495)672-72-77
E-mail: beilinan@mail.ru

Е.В. БУРКОВА, Д.В. БУРКОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ КРЫМА

Аннотация. Проведен анализ антропогенного воздействия на окружающую среду при использовании традиционных способов теплоснабжения. Рассмотрены варианты снижения выбросов от теплогенерирующих объектов. В качестве наиболее эффективного варианта предложено создание тепловых аккумуляторов солнечной энергии.

Ключевые слова: солнечная энергия, тепловой аккумулятор, накопление энергии.

Введение

Благодаря своему климату и природе Крым исторически являлся привлекательным местом для туристического отдыха. После завершения строительства Керченского моста доступность Крымского полуострова для посещения отдыхающими значительно возросла. Одним из основных достоинств Крыма является его экология. В связи с этим, для развития туризма необходимо сохранять и постоянно повышать экологическую безопасность городов и поселков Крыма. Одним из направлений такой деятельности является исследование вопроса по загрязнению южного берега Крыма и других курортных зон выбросами CO, CO₂, NO и других компонентов при работе отопительных систем, использующих традиционные энергоносители (уголь, мазут, газ) и разработка мероприятий по снижению выбросов.

Постановка задачи.

Результаты исследования существующих технико-технологических решений по снижению выбросов от теплогенерирующих объектов при традиционном теплоснабжении городов представлены на рисунке 1. Нужно отметить, что в зависимости от поставленных задач (уровень очистки) и выбора средств очистки, стоимость их может достигать до 50% стоимости котельных агрегатов. В то же время, по существу, экологическое состояние городской среды существенно не улучшится. Это, в первую очередь, связано со снижением количества изымаемых природных ресурсов, количества выбрасываемых вредных веществ, но не изменением их качественного состава или полным устранением загрязнителей. Кроме этого средства очистки требуют регенерации и, таким образом, образуются вторичные загрязнители, для очистки которых требуются дополнительные затраты.

С учетом географического расположения Крыма, наиболее перспективным способом решения проблем с загрязнением, является использование солнечной энергии, которая позволяет решить ряд задач:

– экологические – солнечные электростанции стали экологически чистой альтернативой традиционным источникам энергии, поставляющим значительное количество вредных выбросов в окружающую среду и потенциально опасным для здоровья. Замещение традиционных энергоресурсов (угля, мазута и природного газа), используемых в котельных позволит снизить отрицательное воздействие на окружающую среду продуктов сгорания органического топлива;

– экономико-политические – солнечная энергетика позволяет обеспечить энергетическую независимость региона от внешних поставщиков энергоресурсов.

По данным компании «Activ Solar» [1], почти 40% электроэнергии, поступающей в Крым, теряется при передаче. В то же время, из-за притока туристов и интенсивного использования электрооборудования потребность в электричестве в течение летних месяцев особенно высока, что является актуальным фактором развития солнечной энергетики.

В настоящее время использование солнечной энергии в Крыму осуществляется по двум основным направлениям:

– преобразование в тепловую энергию, используемую для обеспечения горячей водой и отопления зданий;

– преобразование в электрическую энергию, используемую в качестве дополнительной энергии для освещения и питания электрооборудования, установленного в зданиях.

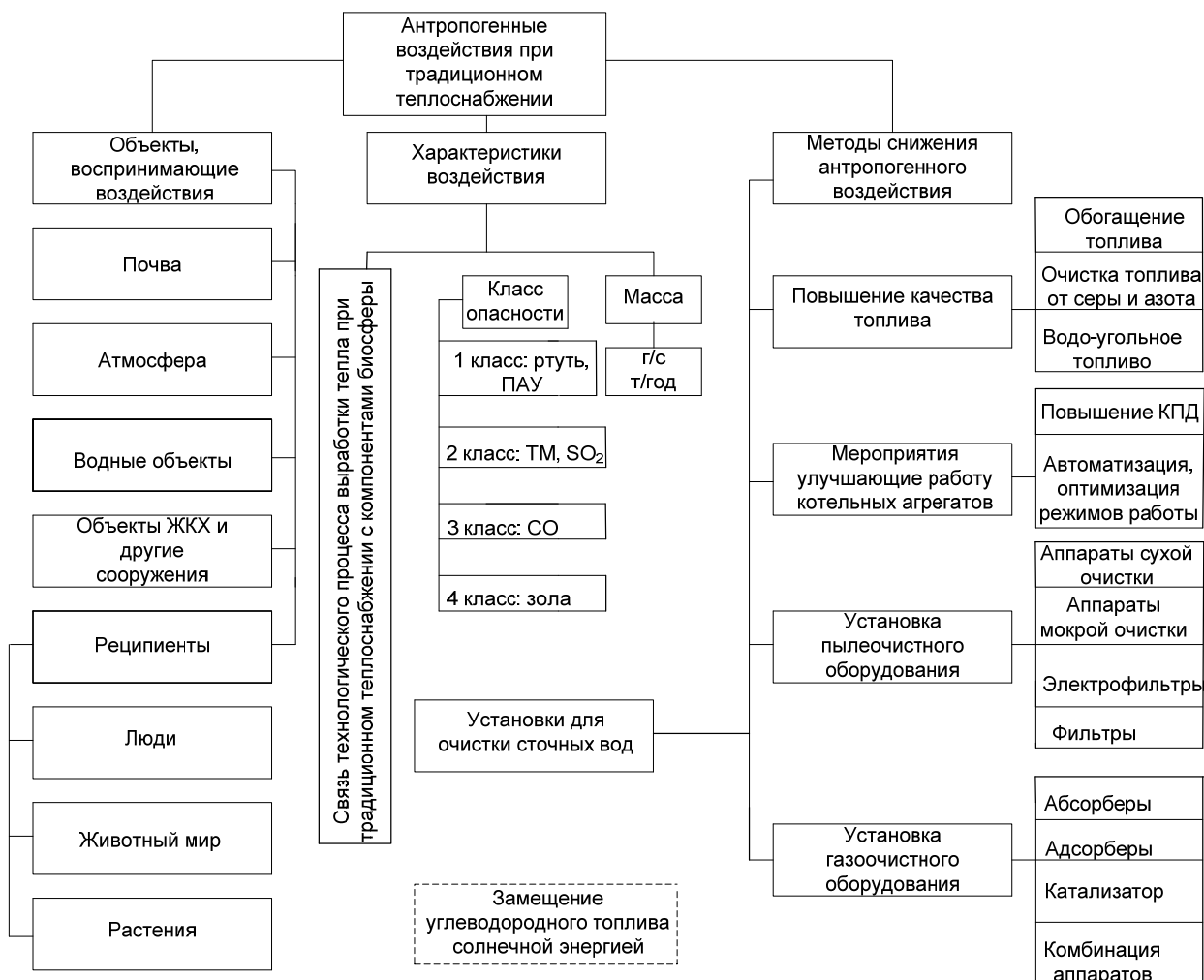


Рисунок 1 – Классификация антропогенного воздействия при традиционном теплоснабжении и способы для его снижения (составлена автором)

Наибольшее распространение получили технологии использования солнечной энергии для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых и общественных зданий. При этом разработка и проектирование солнечных установок для каждого конкретного объекта должна определяться следующими основными факторами: технической возможностью, энергетической эффективностью, экономической целесообразностью и экологической безопасностью реализации предлагаемых технических решений.

Одним из перспективных экологически безопасных направлений использования солнечной энергии является разработка технических решений на базе «солнечного соляного пруда» [2], который является источником тепла для теплогенерирующих объектов. Конструктивно–техническое решение на основе «солнечного соляного пруда» представляет собой резервуар, заполненный соляным раствором, с зачернённым дном и боковыми стенками, температура которого в нижнем придонном слое под действием солнечной радиации достигает 100–120°C и выше [3]. Основное условие работы таких «прудов» – наличие градиента концентрации соли в толще воды, препятствующего перемешиванию различных по температуре слоёв.

Широкое применение таких установок, наряду с энергетическими, позволит решить и экологические проблемы в Крыму, особенно на территориях санаторно–курортных и рекреационных зон.

Результаты и их анализ

Согласно [4] потенциал солнечной энергетики Крыма достаточно высок, и технически возможно, что доля солнечной энергетики достигнет 10% энергетического баланса Крыма уже к 2030 году при существующих темпах развития этого направления.

Одним из ведущих факторов формирования условий для возможности использования солнечной энергии является климат. Общий климатический фон каждой экосистемы создается внешними факторами: общим зональным радиационным режимом, общей циркуляцией атмосферы и т.д. Но свойства самих экосистем (тип и структура растительности, характер почв и др.) приводят к формированию местных климатов и микроклиматов. Летом наибольшие суммы прямой солнечной радиации получают предгорья, северные склоны яйлы и открытые побережья. По направлению к северо-востоку и на Южном берегу отмечается некоторое ее уменьшение, что объясняется увеличением облачности и влажности атмосферы. Зимой положение меняется: день становится короче, высота Солнца меньше, облачность увеличивается, поэтому резко уменьшается приход солнечной радиации. Весной прямая солнечная радиация значительно больше, чем осенью. При этом наблюдается и ее интенсивное нарастание. Наибольшие суммы прямой радиации Крым получает летом (до 50% годовой).

Рассеянная радиация в Крыму значительно меньше прямой. Она составляет 50–70% прямой радиации. Годовые суммы её колеблются от 176 кДж/см² (Ферсманово, южнее Симферополя) до 226 кДж/см² (вершина Роман-Кош на Бабуган-яйле) [5].

Летом суммы рассеянной радиации больше в восточной части Крыма и в горах вследствие увеличения облачности. Зимой распределение радиации более равномерное, причём она увеличивается с севера на юг (максимум в горном Крыму). Рассеянная радиация в Крыму возрастает по направлению на юго-восток и восток и достигает своего наибольшего значения на Керченском полуострове. Результаты многолетних наблюдений за солнечной радиацией в Крыму представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

Таким образом, Крымский полуостров, благодаря своему географическому расположению и климатическим особенностям, является одним из перспективных районов для развития солнечной энергетики.

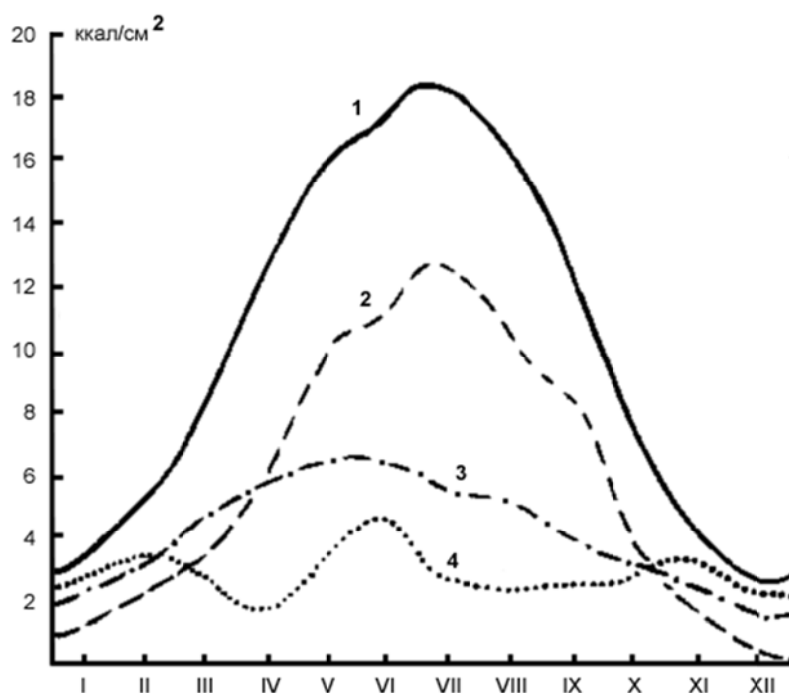


Рисунок 2 – Годовой ход различных видов солнечной радиации и осадков в Крыму:
1 – суммарная радиация; 2 – прямая радиация; 3 – рассеянная радиация; 4 – осадки

Таблица 1 – Продолжительность дня (светлой части суток) в Крыму

Месяц	Число дней	Число часов	Возможное число часов солнечного сияния		Фактическое число часов солнечного сияния		Средняя продолжительность дня	Полуденная высота солнца на 15-е число месяца
			Часы	% от общ. числа часов	Часы	% от общего числа часов		
Январь	31	744	286	38,5	56	22	9 час. 14 мин.	23°53
Февраль	28	672	291	43,3	74	29	10 час. 23 мин.	32°20
Март	31	744	369	49,6	132	41	11 час. 54 мин.	42°52
Апрель	30	720	405	56,2	194	52	13 час. 30 мин.	54°46
Май	31	744	460	61,8	275	64	14 час. 49 мин.	63°52
Июнь	30	720	467	64,8	308	69	15 час. 34 мин.	68°19
Июль	31	744	474	63,7	348	78	15 час. 17 мин.	66°32
Август	31	744	436	58,6	327	80	14 час. 04 мин.	59°03
Сентябрь	30	720	370	51,4	244	72	12 час. 20 мин.	48°02
Октябрь	31	744	340	47,2	173	58	10 час. 55 мин.	36°29
Ноябрь	30	720	288	40,0	88	36	9 час. 36 мин.	26°31
Декабрь	31	744	274	36,8	63	23	8 час. 50 мин.	21°44
Год	365	8760	446	51,0	2272	51	12 час. 13 мин.	–
Наибольшая	31	744	474	64,8	348	80	15 час. 37 мин.	68°30
Наименьшая	30	672	274	36,8	56	22	8 час. 45 мин.	21°30

С учетом существенного влияния времен года на количество получаемой солнечной энергии было принято решение взять за основу разработку экологически безопасного источника теплоснабжения с использованием сезонного аккумулятора тепла. Существуют примеры применения сезонного аккумулирования тепла в подземных хранилищах [6], также прорабатываются технические решения аккумулирования в поверхностных слоях земной поверхности. Имеется опыт аккумулирования тепловой энергии в солнечных прудах [7].

Солнечный соляной пруд представляет собой неглубокий (2–4 м) бассейн с крутым рассолом в нижней его части. В качестве рассола, например, используется насыщенный раствор, состоящий из 95 % хлорида магния и 5 % хлорида кальция. Во избежание растекания жидкости обеспечивается гидроизоляция бассейна. Для сокращения тепловых потерь через грунт рекомендуется обеспечивать теплоизоляцию дна и стенок бассейна. Схема круглогодичного использования солнечного соляного пруда, как резервуара накопленного тепла за счет круглогодичного поглощения и аккумулирования солнечного излучения и дальнейшего перехода этого тепла на более высокий температурный уровень с помощью теплонасосных установок, представлена на рисунке 3.

По своей сути соляной пруд является солнечным коллектором – тепловой ловушкой. В пруду часть солнечного излучения инфракрасного спектра полностью поглощается верхним слоем пресной воды, коротковолнового поглощается более низкими слоями воды, а не поглощенная часть излучения, прошедшего сквозь воду – темным дном. Энергия, отражённая от дна, частично поглотится водой на обратном пути. В обычном бассейне тёплая и холодная вода перемешиваются благодаря естественной конвекции. тёплая вода имеет меньшую плотность, и она поднимается к поверхности.

Насыщенный соляной раствор имеет большую плотность (примерно 1,5 г/см³) и поэтому при нагревании не может подниматься вверх. Физические свойства промежуточного «градиентного» слоя с резким изменением плотности соответствуют значениям теплового сопротивления стен большинства эксплуатируемых зданий. При этом тепловое сопротивление поверхностного слоя воды в 1000 раз ниже теплового

сопротивления градиентного слоя.

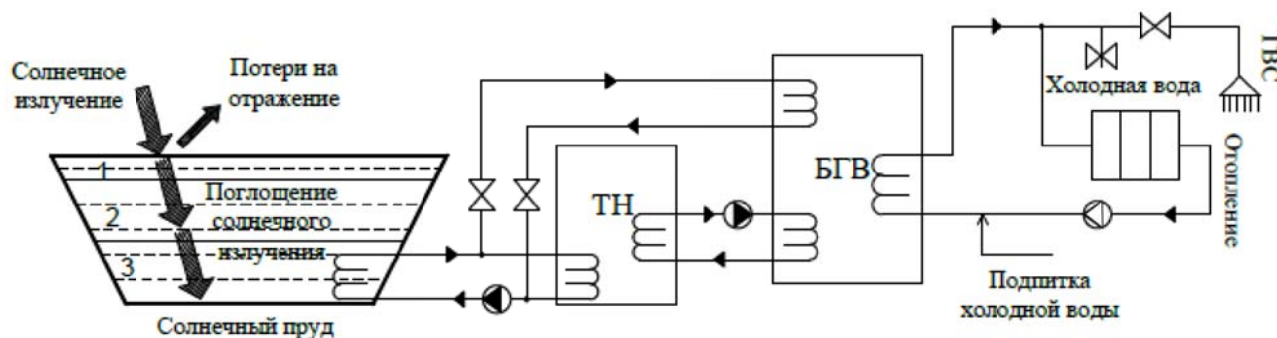


Рисунок 3 – Схема теплоснабжения на базе солнечного соляного пруда:

*1 – верхний слой пресной воды; 2 – слой переменной солености; 3 – слой с повышенным содержанием соли;
ТН – тепловой насос; БГВ – бак горячей воды*

Таким образом, энергия солнечного излучения, пройдя через толщу раствора, практически полностью задерживается в нижнем слое пруда и не имеет выхода наружу. Такое свойство приводит к резкому повышению температуры соляного раствора, которая может достигать 100 °С. В отличие от обычных солнечных коллекторов, в которых роль тепловой ловушки играют имеющие незначительный объем колбы, объем и теплоемкость соляного пруда очень велики. Это позволяет использовать соляной пуд не только в качестве солнечного коллектора, но и в качестве аккумулятора тепловой энергии. Коэффициент использования установленной мощности для соляных прудов составляет примерно 0,73.

В солнечном пруду происходит одновременное улавливание и накопление солнечной энергии в большом объеме жидкости. Обнаружено, что в некоторых естественных соляных озёрах температура воды у дна может достигать 70°С. Это обусловлено высокой концентрацией соли. В обычном водоёме поглощаемая солнечная энергия нагревает в основном поверхностный слой, и эта теплота довольно быстро теряется, особенно в ночные часы и при холодной ненастной погоде из-за испарения воды и теплообмена с окружающим воздухом. Солнечная энергия, проникающая через всю толщу жидкости в солнечном пруду, поглощается окрашенным в тёмный цвет дном и нагревает прилегающие слои жидкости, в результате чего температура ее может достигать 90–100°С, в то время, как температура поверхностного слоя остается на уровне 20°С. Благодаря высокой теплоёмкости воды в солнечном пруду за летний сезон накапливается большое количество теплоты, и вследствие низких тепловых потерь падение температуры в нижнем слое в холодный период года происходит медленно, так что солнечный пуд служит сезонным аккумулятором энергии. Теплота к потребителю отводится из нижней зоны пруда.

Нужно отметить, что общая толщина слоев воды в солнечных прудах не превышает 3 м. Наиболее крупный из существующих солнечных прудов находится в местечке Бейт-Ха-Арава в Израиле. Его площадь составляет 250000 м², он используется для производства электроэнергии. Электрическая мощность энергетической установки, работающей по циклу Ренкина, равна 5 МВт. Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии значительно ниже, чем на солнечных электростанциях других типов. Крупные системы сезонного аккумулирования тепла в жилом секторе уже построены в нескольких странах, но по-прежнему остаются довольно дорогими. Размеры центрального хранилища варьируют от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч кубических метров. Крупнейшее в Европе хранилище такого рода расположено в городе Оулу (Финляндия). Оборудованное в гигантской каменной пещере объемом в 200 000 м³, оно подключено к теплоэлектроцентрали, которая построена в рамках программы EU – Thermic.

Еще один успешный проект сезонного хранения горячей воды находится в городе Люкебо (Швеция). Здесь используют скальную пещеру, наполненную водой (объемом 105 000 м³), и плоские солнечные коллекторы площадью 28 800 м², которые поставляют

100% необходимой энергии (8500 МВт·ч/год) для горячего водоснабжения и отопления 550 домов. Все эти дома подключены к коммунальной системе районного отопления. Температура воды, подаваемой потребителям, составляет 70°C, а возвратной воды – 55°C.

На рисунке 4 в общем виде представлен процесс преобразования солнечной энергии в тепловую с использованием аккумулятора. На верхнем графике представлен процесс поглощения солнечной энергии, где Q_u – производительность коллектора, L – нагрузка в функции от времени для суточного периода.

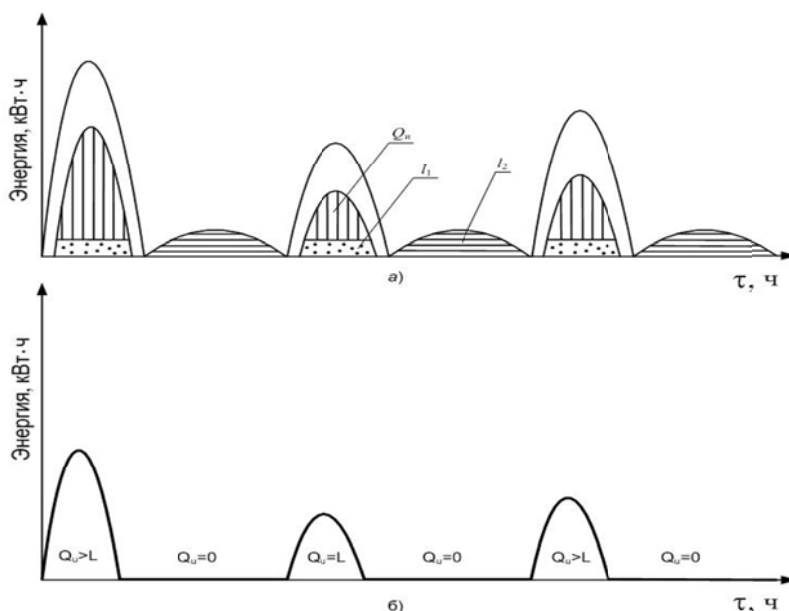


Рисунок 4 – Расчётный процесс преобразования солнечной энергии с суточным аккумулярованием и её использование, где $L = I_1 + I_2$

Вертикально заштрихованные площади представляют собой избыточную энергию, которую следует аккумулировать, а горизонтально заштрихованные – энергию, отбираемую от аккумулятора для покрытия нагрузки в период отсутствия солнечной радиации. Площади, отмеченные точками, обозначают энергию, поступающую к потребителю от коллектора во время его работы. На нижнем графике представлена энергия, которая подводится к аккумулятору и отбирается от него в период времени, отсчитываемый от $\tau=0$. В этом примере в течение рассматриваемого периода времени поглощённая солнечная энергия несколько превышает интегральную нагрузку. Техническое решение указанной задачи осуществляется с применением принципиальной схемы: преобразование солнечной энергии в тепловую происходит в коллекторе, а накопление тепловой энергии – в ёмкостном аккумуляторе. Вода, проходя через солнечный коллектор, нагревается и, проходя через змеевик, нагревает воду в баке – аккумуляторе, которая затем идёт к потребителю.

Заключение

Предложенный вариант преобразования и накопления солнечной энергии позволяет решить вопрос снабжения теплом населенных пунктов Крыма в течение всего года. При этом перспективным является дальнейшее развитие данных исследований в направлении использования отработанных карьеров в качестве соляных прудов, что позволит одновременно решить вопрос с накоплением тепловой энергии и рекультивации карьеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roselund C. Large-scale PV comes to the Ukraine: Active Solars Ohotnikovo and Perovo PV plants [Electronic resource] / C. Roselund // Solar Server. Global Solar Industry Website. – Режим доступа: <http://www.solarserver.com/>
2. Новые конкурентоспособные технологии солнечной энергетики. – Режим доступа: <http://www.intersolar.ru>.

3. Казанджан Б. И. Современные системы солнечного теплоснабжения / Б. И. Казанджан // Энергия. – М.: 2005. – № 12. – С. 75–78.
4. Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века / Под ред. В.С. Тарасенко, О.М. Козлова. – Симферополь: «Экология и мир», 2001. – 400 с.
5. Климатический атлас Крыма.– Симферополь: Таврия–Плюс, 2000.– 118 с.
6. Fedrizzi R. Intro – What LEED Measures / R. Fedrizzi. – United States Green Building Council, 2010. – 375 p.
7. Germany Installs Over 2000 MW in 2004 // Wind Directions. – 2005. – January/February. – P. 9–16.

Буркова Елена Викторовна

Севастопольский государственный университет, г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техносферная безопасность»
E-mail: lena1b@mail.ru

Бурков Дмитрий Валериевич

Севастопольский государственный университет, г.
Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергоустановки морских судов и сооружений»
E-mail: dv.burkov@mail.ru

E.V. BURKOVA, D.V. BURKOV

THE USE OF HEAT ACCUMULATORS OF SOLAR ENERGY IN CRIMEA

Abstract. *The analysis of anthropogenic impact on the environment using traditional methods of heat supply. Options for reducing emissions from heat-generating facilities are considered. As the most effective option, the creation of solar thermal batteries is proposed.*

Keywords: *solar energy, heat accumulator, energy accumulation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Roselund C. Large-scale PV comes to the Ukraine: Active Solars Ohotnikovo and Perovo PV plants [Electronic resource] / C. Roselund // Solar Server. Global Solar Industry Website. – Режим доступа: <http://www.solarserver.com/>
2. New competitive solar energy technologies. – Access mode: <http://www.intersolar.ru>.
3. Kazandzhan B. I. Contemporary solar heating / B. I. Kazandzhan // Energy. – М.: 2005. – № 12. – С. 75–78.
4. Sustainable Crimea. The energy strategy of the XXI century / Under the editorship of V. S., Tarasenko, O. M. Kozlov. – Simferopol: "Ecology and peace", 2001. – 400 с.
5. Climate Atlas of Crimea.– Simferopol: Tavria–Plus, 2000.– 118 с.
6. Fedrizzi R. Intro – What LEED Measures / R. Fedrizzi. – United States Green Building Council, 2010. – 375 p.
7. Germany Installs Over 2000 MW in 2004 // Wind Directions. – 2005. – January/February. – P. 9–16.

Burkova Elena Viktorovna

Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., associate professor of the Department
«Technosphere safety»
E-mail: lena1b@mail.ru

Burkov Dmitiy Valerievich

Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D., associate professor of the Department «Power
plants of ships and structures»
E-mail: dv.burkov@mail.ru

М.С. ДЕНИСОВ

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРШНЕЙ ДВС НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ

Аннотация. Проанализированы особенности обработки жидкого и кристаллизующегося металла давлением. Проведен анализ методов управления сложными производственными процессами. На основе анализа выявлена целесообразность разработки автоматизированной системы управления процессом обработки кристаллизующегося металла давлением. На основе обзора современных систем управления, сделан выбор в пользу адаптивной системы управления процессом.

Показано, что высокое качество готовой продукции при минимальных материальных и энергетических затратах возможно обеспечить за счет автоматизации управления основными параметрами технологического процесса с использованием современных контрольно–измерительных систем, средств автоматизации и интегрированных АСУ.

Проанализированы литературные источники, где вопросы управления сложными многомерными производственными процессами поднимали Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А.Л., Пилипенко, А.В и др. В работах указанных авторов обращается внимание на актуальность процессов обработки кристаллизующегося металла давлением с применением гидропрессового оборудования. Однако из доступных источников видно, что возможность обработки давлением жидкого металла до начала кристаллизации остается не изученной.

Проведены исследования физико–механических свойств получаемых заготовок поршней ДВС, изучены микроструктуры сплава, полученные при разных режимах опрессовки. В результате исследований были определены цель и задачи по проектированию автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Ключевые слова: кристаллизующийся металл, адаптивные системы управления, многомерный объект управления, физико–механические свойства, технологический процесс, моделирование.

Введение

По своему характеру процессы металлообработки являются дискретно–непрерывными. Существующая статистика показывает невозможность адекватного отображения протекающих производственных процессов, т.е. соответствия данных физических потоков – информационным [1].

В этой связи можно утверждать, что разработка автоматизированной системы управления процессом производства ответственных деталей, полученных методом литья с кристаллизацией под давлением, является актуальной научно–технической задачей [2].

Современная теория управления, в основу которой заложены известные работы Л.С. Понтрягина, Р.Беллмана и Р.Калмана и др., базируется на описании систем в пространстве состояний. Описание в пространстве состояний представляет собой общий взгляд на любые системы и пригодно для исследования и проектирования сложных систем с многими входами и выходами, то есть адаптивных систем.

Большинство технологических процессов обработки кристаллизующегося металла под давлением выполняется на гидропрессовом оборудовании [3]. Особенностью гидравлических прессов является наличие в цилиндрах и трубопроводах рабочей жидкости, свойства которой изменяются, вследствие чего в работе проявляются сложные нелинейные эффекты, затрудняющие управление динамическими процессами. Вследствие накопления энергии упругих деформаций в гидросистемах технологического оборудования, изменения вязкости рабочей жидкости и коэффициента трения под влиянием температурных воздействий возникает необходимость исследования переходных процессов и в создании системы управления, которая обеспечивает изменения режимных параметров по заранее заданному закону.

Во время опрессовки сближение атомов происходит при отводе некоторого количества теплоты, так что изменение величины и скорости наложения давления обеспечивает сближение атомов на разные расстояния действия упругих сил отталкивания до

начала кристаллизации. Возможность накопления и изменения энергии упругих межатомных взаимодействий в жидком металле рассматривается как фундаментальная основа для формирования структуры металла и связанных с ней свойств [4].

Существующие подходы к управлению формированием и прогнозированию свойств деталей и изделий основаны на использовании пространственно распределенных металлургических технологий плавки, разливки, охлаждения, пластической деформации из закристаллизовавшегося металла, а также на различных режимах термической обработки, что в современных условиях автоматизированного управления производственными процессами становится не выгодно как с технологической, так и с экономической точек зрения [5].

Решение поставленных задач возлагается на автоматизированные системы управления технологическими процессами, которые развиваются в различных направлениях. Значительный научный и практический интерес представляют системы управления объектами, свойства которых неизвестны, это объекты, состояние и поведение которых предсказать, предугадать не представляется возможным.

Основная часть

С точки зрения управления, расплав представляет с собой объект, входом которого являются скорость и величина накладываемого давления, температура и скорость ее изменения, а выходом – свойства. Внутри объекта протекают фазовые превращения, химические реакции, формируются кристаллические, квазикристаллические и др. фазы. Наложение давления оказывает влияние и изменяет кинетические закономерности и механизмы названных процессов. Изменяя режим наложения давления на кристаллизующийся металл, можно влиять на изменение взаимного расположения атомов компонентов расплава, на число и эффективность межатомных связей, что определяет достижение соответствующих свойств [6].

Переменными параметрами (на входе), которые влияют на формирование структуры и свойств получаемого изделия, являются давление, накладываемое на жидкий металл, скорость наложения давления, температура и скорость изменения температуры (охлаждения).

В этой связи ставится задача исследования влияния различных режимных параметров процесса на физико–механические и структурные свойства получаемых заготовок поршней ДВС.

Для исследования микроструктур используется растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D, который, позволяет вести наблюдения образца во вторичных электронах и отраженных электронах (рисунок 1).

Для измерения твердости по Бринеллю в соответствии с ГОСТ 23677–79 использовался твердомер ТШ–2 (таблица 1).

На электронномикроскопических снимках (рисунок 1) алюминиевого сплава, кристаллизация которого проходила по третьему режиму обработки (см. табл. 2), наблюдается зёрненная структура, содержащая дислокации, которые встраиваются в зерна. Наблюдаются также тройные стыки зерен с встроенными дислокациями. Кроме того можно выделить небольшое количество субзерен. Размеры субзерен составляют $10^{-5} \dots 10^{-4}$ см. Зерна в структуре алюминия разориентированы друг относительно друга на несколько десятков градусов. Блоки (субзерна) повернуты по отношению друг к другу на углы от нескольких секунд до нескольких минут и образуют малоугловые границы.

Обработка кристаллизующегося металла по второму режиму становится причиной образования структуры, не имеющей равноосных стыков. Размер зерен уменьшился, и в структуре зерна увеличилось количество субзерен. Кроме того уменьшилась разориентировка зерен относительно друг друга.

Наложение давления на расплав по первому режиму приводит к образованию еще более гладких зерен. Кроме того, обнаружена нанокристаллическая структура, окруженная матрицей. Образующиеся нанокристаллы являются однокомпонентными и содержат алюминий, имеющий ГЦК – решетку. При этом образующиеся нанокристаллы размером

12...40 нм являются бездефектными и имеют правильную форму. Кроме того, границы зерен более совершенны, их структура более упорядоченная. Вероятно, увеличение давления до 500 МПа и увеличение скорости наложения давления приводит к перемещению дислокаций по так называемым плоскостям скольжения (плоскостям с наиболее плотной упаковкой). Количество линейных и поверхностных дефектов в такой структуре уменьшается на 3 – 4 порядка.

Наложение давления, приводит к сближению атомов, создает условия для конкурентного роста из большего числа центров. В этом смысле влияние давления аналогично влиянию переохлаждения. Существенное отличие состоит в том, что в данном случае конструкционный материал формируется из отдельных нанокристаллических кластеров путем замыкания связей между атомами, расположенными на соприкасающихся поверхностях при значительно меньшей концентрации вакансий, дислокаций и других дефектов кристаллического строения, которые снижают сопротивление разрушению под нагрузкой.

Улучшение механических свойств под влиянием давления может быть связано, прежде всего, с уплотнением металла в местах расположения микропор, микрорыхлот, а также с опрессовкой межзеренных границ.

В таблице 1 приведены результаты измерений твердости.

Таблица 1 – Твердость сплава АК12 в зависимости от закона наложения давления

№ образца	Режим обработки, №	Марка алюминия	НВ
1	1)	АК12	77
2	2)	АК12	59
3	3)	АК12	41

Таблица 2 – Режимы обработки алюминиевого сплава АК12

№, режим обработки	Способ обработки	t , с	P , МПа
1)	РНД	3	500 МПа
2)	РНД	18	500 МПа
3)	РНД	3	400 МПа

РНД – регулируемое наложение давления, t – время выхода давления на максимальную величину, P – максимальная величина накладываемого давления

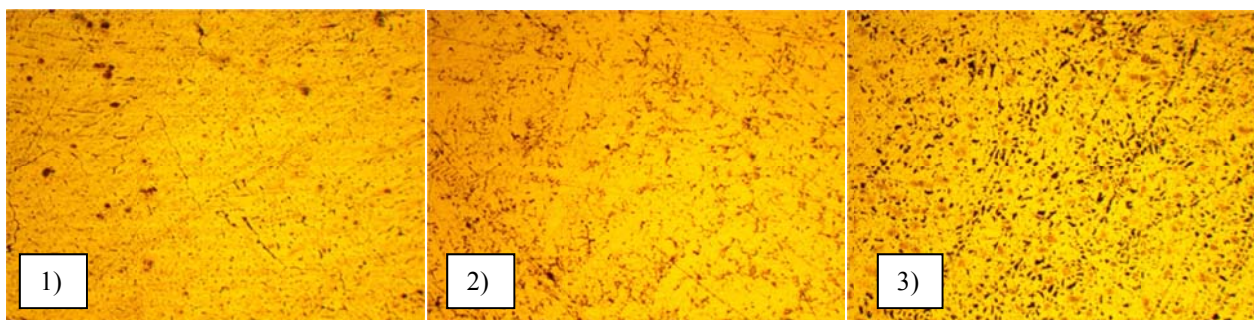


Рисунок 1 – Микроструктуры алюминиевого сплава АК12 после обработки по различным режимам. Режимы обработки приведены в таблице 2. ($\times 50$)

Разработка системы управления

На основе проведенных экспериментальных исследований, были выявлены параметры, требующие контроля и управления, а также разработан подход к автоматизации технологического процесса.

Использование серийно выпускаемых машин и процессов для обработки расплавленного металла давлением бесперспективно, так как это оборудование не может обеспечить управление изменением давления по определенному, заранее установленному закону.

Разрабатываемые системы управления необходимо оснащать динамическими экспертными системами. Информация о поведении металла под давлением в таких системах может быть доведена до уровня концептуальных знаний, на основе которых будут разрабатываться соответствующие технологические процессы и алгоритмы управления.

Рассматривая работу гидравлического пресса, получаем следующую систему дифференциальных уравнений [7,8] (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \frac{dv_1}{dt} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - P_y; \\ M_2 \frac{dv_2}{dt} = p_2 F_2 - p_1 F_1 - x_2 C_2 + P_y; \\ \frac{dp_1}{dt} = \alpha_1 \left(\frac{dQ_{abc}}{dt} - F_1 \frac{dx_1}{dt} + F_1 \frac{dx_2}{dt} \right); \\ \frac{dp_2}{dt} = \alpha_2 \left(F_2 \frac{dx_1}{dt} - F_2 \frac{dx_2}{dt} - q_2 \right); \\ \frac{dx_1}{dt} = v_1; \\ \frac{dx_2}{dt} = v_2; \\ \frac{dQ_{abc}}{dt} = Q_n - \left(\frac{\pi d_n^2}{4} * \frac{dx_3}{dt} + \mu_{др} * S_{др}(\theta) * \sqrt{\frac{2}{\rho}} |p_n| * p_n - k_{ут} * p_n \right); \\ \frac{dx_3}{dt} = R_{вал} * \sin \theta * tg \omega - R_{вал} * \cos \theta * \frac{1}{\cos^2 \gamma} - R_{вал} * tg \beta * \cos \theta * \omega \end{array} \right. \quad (1)$$

где M_1 – масса поршня и штока;
 M_2 – масса плиты с присоединенной оснасткой;
 x_1, v_1, t_1 – перемещение, скорость и время движения штока;
 x_2, v_2 – перемещение и скорость плиты;
 c_2 – коэффициент жесткости фундаментальных болтов;
 P_y – сопротивление упругости обрабатываемого металла;
 F_1, F_2 – площадь поршня рабочей и возвратной полостей;
 Q_n – геометрическая подача поршня;
 p_1, p_2 – давление жидкости в рабочей и возвратной полостях цилиндра;
 Q_{abc} – подача насоса;
 α_1, α_2 – коэффициент жесткости напорной и сливной магистралей пресса;
 q_2 – удельный расход жидкости через дроссель;
 γ – угол наклона диска;
 ω – угловая скорость вала;
 $Q_{ут}$ – утечки из поршневой камеры;
 θ – угол разворота распределителя;
 β – дополнительный угол в плоскости, перпендикулярной плоскости, образованной кинематической нейтралью и ее проекцией на опорную плоскость;
 d_n – диаметр плунжера;
 $S_{др}(\theta)$ – площадь окна дросселирования.

Решение системы уравнений (1) и исследование влияния этих параметров на динамические процессы необходимо выполнять численным интегрированием на ЭВМ.

Ранее установлено, что управление формированием структуры возможно, накладывая на кристаллизующийся металл давление по закону, согласованному со скоростью кристаллизации [9].

Речь идет о наложении давления на уровне 400...500 МПа с компенсацией усадки в пределах 10...15 % в течение отрезка времени 5...10 с при опрессовке заготовок из сплава AlSi12 массой 2,8 кг. Потребная мощность гидропривода при этом составляет $N = pQ = 10 \text{ Па} \cdot \frac{10^{-3} \text{ м}^3}{n} = 10 \text{ кВт}$. Это соответствует установленной мощности применяемого гидропривода,

Для разработки математической модели выбрана среда MATLAB.

Функции пакета реализуют методы исследования динамических систем, основанные на использовании передаточных функций и моделей для переменных состояния. Частотные и временные характеристики, нули и полюсы систем легко вычисляются и отображаются в виде графиков и диаграмм.

Командное меню Command Window – основной элемент среды, позволяющий решить поставленные в работе задачи.

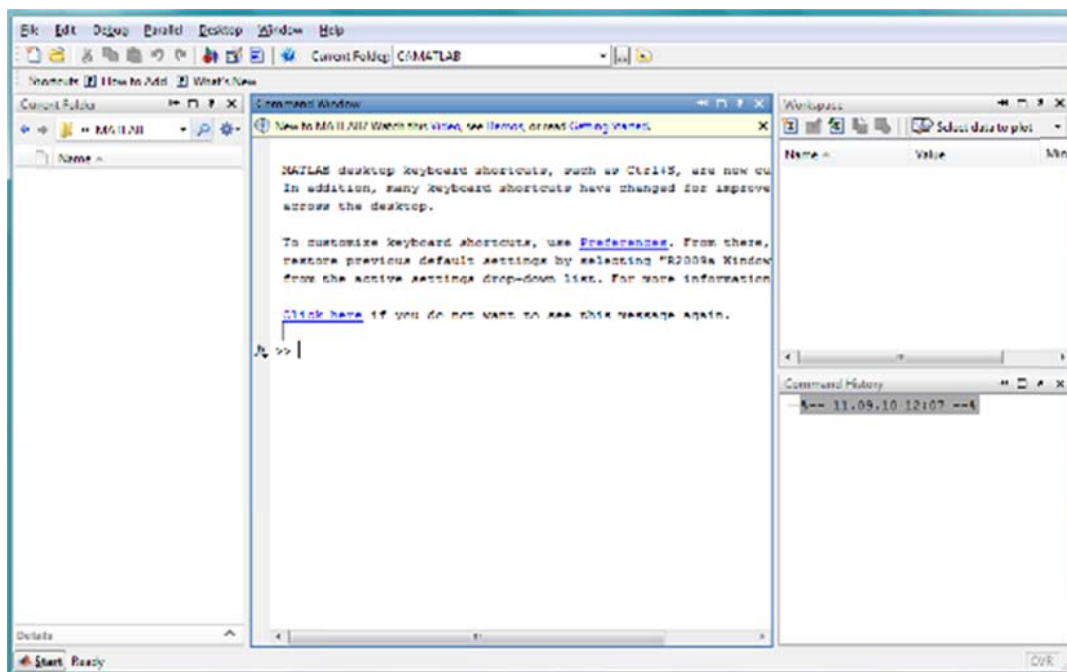


Рисунок 2 – Интерактивная среда моделирования Simulink

Пакет Simulink (рисунок 2) служит для моделирования выбранных систем и устройств.

Блок–схема моделируемой системы включает в себя несколько блоков–источников, генерирующих сигналы, которые вызывают «движение» моделируемой системы, и блоки приемников, которые позволяют получить информацию о выходных сигналах системы.

Передаточная функция замкнутой системы, охваченной обратной связью:

$$W_3(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{K_d K / K_{oc}}{T^2 s^2 + 2T\xi s + s + K}.$$

Расчет коэффициента усиления, постоянной времени, коэффициента демпфирования:

$$K = \frac{2FK_y K_{oc}}{K_p \lambda + 2F^2},$$

где $\lambda = 1,5 \cdot 10^4$ кг/с – коэффициент вязкого трения.

$$\text{Передаточное отношение } Kp = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{p_n}}; Ky = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_n};$$

$$\hat{E}\delta = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{\delta_i}} = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{10}} = 2,2 \cdot 10^{-9}; Kp = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{p_n}}$$

$$\hat{E}\delta = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_i} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{10} = 1,6 \cdot 10^{-4}; Ky = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_n}$$

$$K = \frac{2FK_y K_{oc}}{K_p \lambda + 2F^2} = \frac{2 \cdot 314 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65}{2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2} = 3,2 \cdot 10^{-3};$$

$$T = \sqrt{\frac{MV}{E(K_p \lambda + 2F^2)}}$$

где объем полости гидроцилиндра $V = \frac{FL}{2} = \frac{314 \cdot 10^{-4} \cdot 440 \cdot 10^{-3}}{2} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$,

$M = 30591 \text{ кг}$.

модуль упругости рабочей жидкости $E = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$

$$T = \sqrt{\frac{MV}{E(K_p \lambda + 2F^2)}} = \sqrt{\frac{30591 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^9 \cdot (2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2)}} = 0,16$$

$$\xi = \frac{V\lambda + K_p EM}{2\sqrt{EMV(K_p \lambda + 2F^2)}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^9 \cdot 30591}{2 \cdot \sqrt{1,5 \cdot 10^9 \cdot 30591 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2)}} = 4,3$$

Тогда

$$W_3(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{K_A \cdot K / K_{oc}}{T^2 s^3 + 2T\xi s^2 + s + K} = \frac{0,0049}{0,025 \cdot s^3 + 1,376 \cdot s^2 + s + 0,032}$$

На рисунке 3 показана структурная схема замкнутой системы после подстановки в передаточную функцию найденных значений коэффициента усиления, постоянной времени, коэффициента демпфирования.

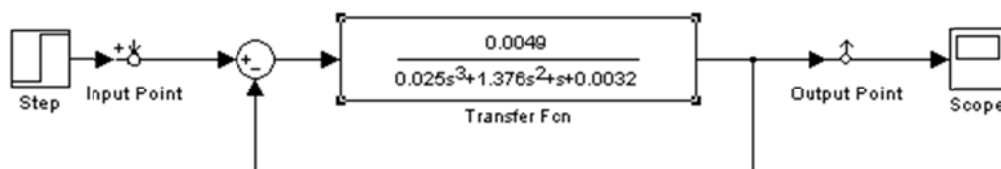


Рисунок 3 – Структурная схема замкнутой системы

График переходного процесса изображен на рисунке 4.

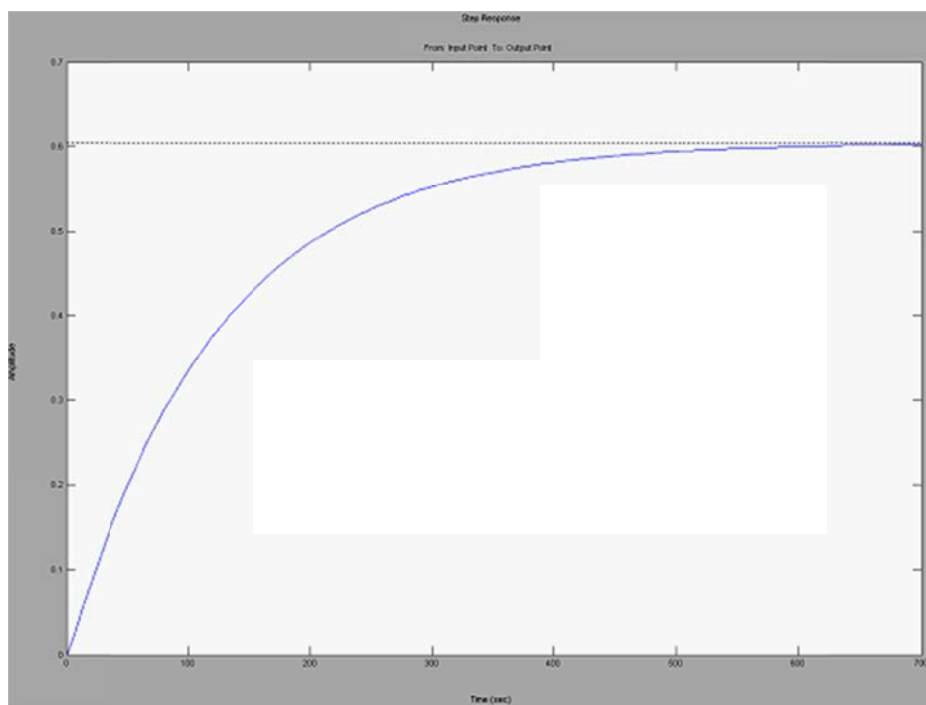


Рисунок 4 – График переходного процесса

Примеры программ исследования поведения звена в зависимости от изменения параметра p представлены на рисунке 5, где



$p = 300$ МПа,
 $P = 400$ МПа,
 $p = 500$ МПа,

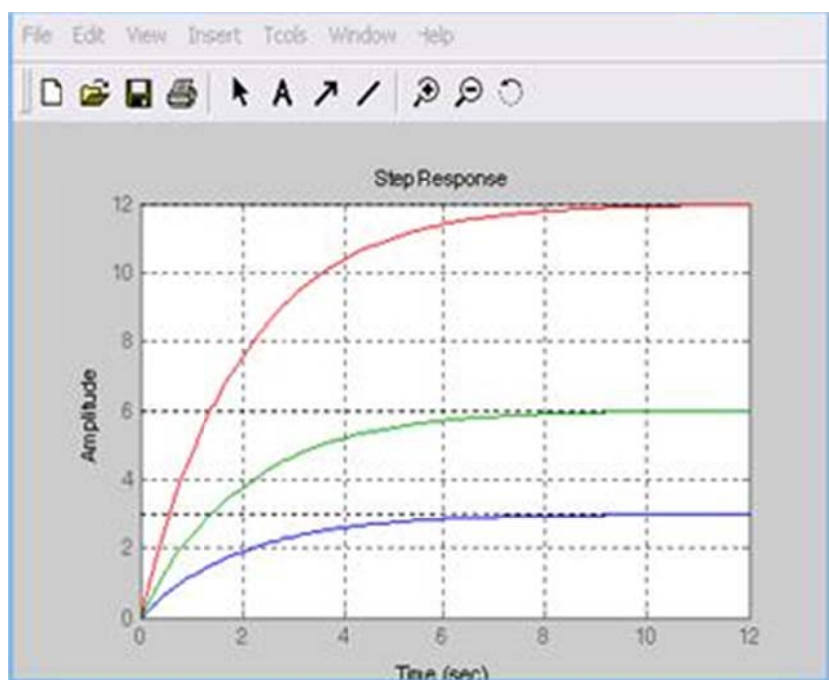


Рисунок 5 – График переходного процесса

Также проведен синтез АСР на основе ПИД-Регулятора с использованием программной среды CurveExpert.

При начале работы с программой вводим координаты точек, согласно требуемому закону изменения давления (рисунок.6).

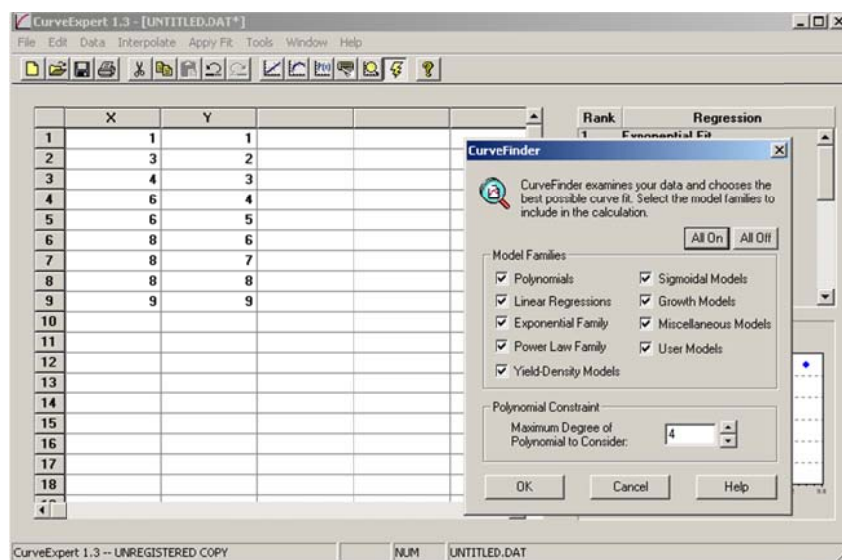


Рисунок 6 – Интерфейс программы

После получения результатов вычисления, выбираем функцию, максимально соответствующую введенным данным. Для этого необходимо определить значение « σ », которое должно быть максимально близко к единице (рисунок 7).

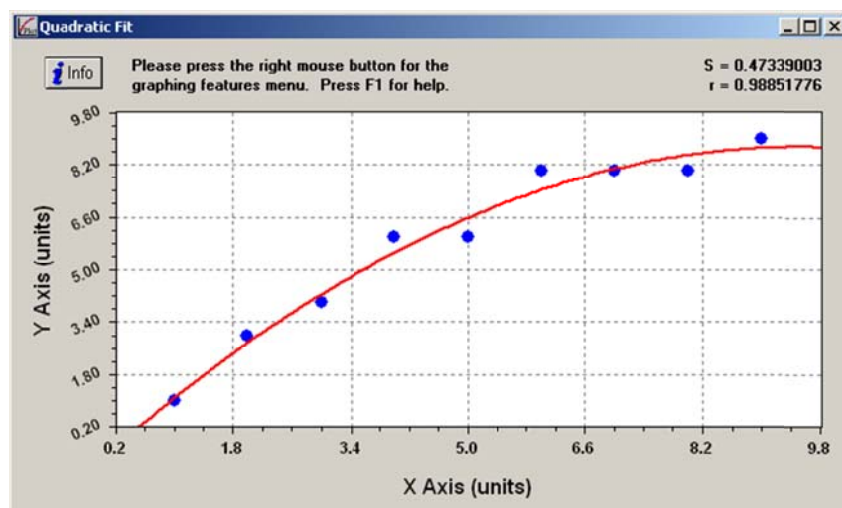


Рисунок 7 – Определение функции входящего сигнала

В сумме, три компоненты ПИД-регулятора обеспечивают получение эффективного результата в коротком промежутке времени.

По окончании процесса оптимизации, оптимальные значения настраиваемых переменных, соответствующие кривой зеленого цвета, сохраняются в рабочем пространстве MATLAB.

Возможность потери устойчивости является основным недостатком систем с обратной связью [10,11]. Поэтому обеспечение необходимого запаса устойчивости являются самым важным этапом при разработке и настройке ПИД-регулятора (рисунок 8).

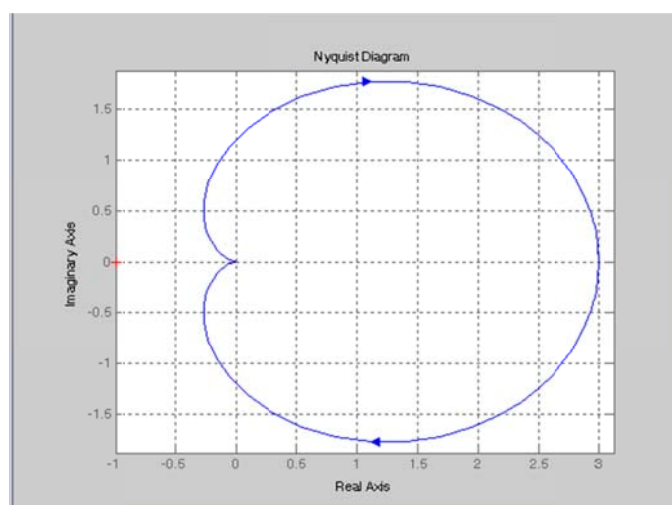


Рисунок 8 – Диаграмма Найквиста

Критерий устойчивости Найквиста: Для того чтобы САР была устойчива в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая частотная характеристика ее разомкнутого контура не охватывала точку с координатами $(-1;j0)$ [12, 13].

В соответствии с этими требованиями разработана обобщенная структурная схема системы управления (рисунок 9).

Программируя скорость движения прессующих плунжеров, следует изменять положение дросселя в магистрали подачи рабочей жидкости в полость гидроцилиндра, а необходимую точность отработки закона наложения давления обеспечивать подбором настроек ПИД – регулятора [14].

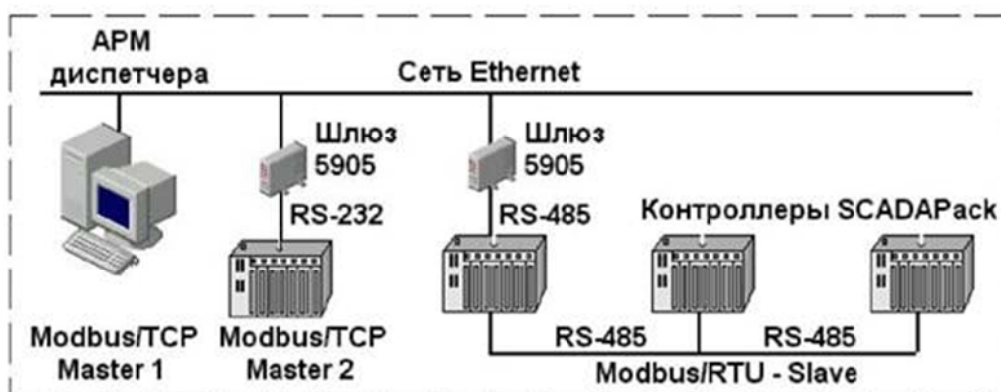


Рисунок 9 – Обобщенная структура системы управления процессом наложения давления

Автоматизацию управления формированием свойств металлопродукции целесообразно осуществлять на основе контроля и стабилизации зависимости относительной сжимаемости расплава от величины накладываемого давления. В качестве технических средств при этом использованы компьютерная система управления, ПИД – регулятор, управляемый с помощью мехатронного устройства дроссель.

Анализ устойчивости и качества управления проектируемой системы был проведен по частотным критериям оценки, который показал, что система устойчива и обеспечивает необходимое качество регулирования [15].

Разработанная адаптивная система управления позволяет осуществлять контроль всех требуемых параметров, а также выполнять корректирующие воздействия.

Кроме того, в программе предусмотрено несколько режимов отображения информации и возможность вносить корректирующие коэффициенты во время работы системы.

В результате проведенных экспериментальных исследований в работе предложено решение задачи по АСУ ТП наложения давления на кристаллизующийся металл металла на базе гидравлического пресса. Результаты могут быть использованы промышленными предприятиями.

Заключение

В работе решена актуальная и практически важная задача по созданию адаптивной системы управления процессом производства заготовок для последующей штамповки из них поршней ДВС.

В работе проведены экспериментальные исследования по разработке автоматизированной системы управления процессом наложения давления с применением адаптивных алгоритмов, позволяющих поддерживать заданный закон наложения давления.

Анализ устойчивости и качества управления проектируемой системы был проведен по частотным критериям оценки, который показал, что система устойчива и обеспечивает необходимое качество управления.

Определено, что для достижения устойчивости системы управления требуется управление по ПИД–регулятору. Пропорциональная составляющая в ПИД–регуляторе работает в момент появления рассогласования. Для компенсации внешнего воздействия в цепь добавлена интегральная составляющая. Для компенсации влияния задержек между воздействием и реакцией системы в систему добавлена дифференциальная составляющая.

Показано влияние технологических режимов наложения давления на структуру и механические свойства заготовок поршней ДВС из алюминиевого сплава.

Обоснованы режимы автоматического управления процессом наложения давления;

Разработана автоматизированная система управления процессом наложения давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами // Анализ и синтез нелинейных систем.— СПб.: Наука, 2000.— 549 с.
2. Пилипенко, А.В. Адаптивная система управления нестационарным технологическим процессом формоизменения. / А.В. Пилипенко // Информационные системы и технологии. 2011. 4/46. С. 115–119.
3. Коростелев В.Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления. М.: Издательство "Новые технологии" 2004, 224 с., ISBN 5–94694–016–3
4. A. Zhilyaev and A. Pshenichnyuk—Oxford, Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials, Cambridge. Int. Science Publishing Ltd. (2011), 326 p.
5. Райбман Н. С., Чадеев В. М. Построение моделей процессов производства. М.: Энергия, 1975. С. 374.
6. Alevaskis G., Seborg D. E. An extension of the Smith predictor method to multivariable linear systems containing time delays //Int. J. Control. 1973. V. 17. №3. P. 541 551.
7. Пилипенко, А.В. Исследование и модернизация математической модели работы гидропрессового оборудования / А.В. Пилипенко, В.Г. Абашин, А.П. Пилипенко // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013, №8, С. 26–33.
8. Даршт, Я.А. Имитационное моделирование гидроаппаратов / Я.А. Даршт / Международная научно-техническая конференция. "Гидромашиностроение. Настоящее и будущее": Тезисы докладов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.— С.28–29.
9. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology //IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559–576.
10. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. A survey of adaptive control systems// IRE Trans. on Automatic Control.— 1958.— Vol. AC–6, no. 12.— Pp. 102–108.
11. Bastin G., Gevers M. Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 33, no. 7.— Pp. 650–658.
12. Давыдов Н. И., Идзон О. М., Смирнова О. В. Определение параметров ПИД-регуляторов по переходной характеристике системы.// Теплоэнергетика. 1995. № 10.
13. Денисенко В. ПИД регуляторы: вопросы реализации. СТА 2008, №1. с. 89
14. Живоглядов В. П. Адаптация в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Фрунзе: Илим, 1974. С. 227.
15. Паршева Е. А. Децентрализованное адаптивное управление по выходу многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию //Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №5. С. 14–22.

Денисов Максим Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

кафедра «Автоматизация технологических процессов»

аспирант

Тел: (4922) 47–98–61+7 915 798 28 74

E-mail denisovmaxim90@mail.ru

M.S. DENISOV

IMPROVING THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES PISTONS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE BASED ON THE AUTOMATION PROCESS OF APPLYING PRESSURE ON CRYSTALLIZING METAL

Abstract. *The features of liquid and crystallizing metal treatment by pressure are analyzed. The analysis of control methods of complex production processes. On the basis of the analysis expediency of development of the automated control system of process of processing of the crystallizing metal by pressure is revealed. Based on the review of modern control systems, the choice is made in favor of an adaptive process control system.*

It is shown that the high quality of the finished product with minimal material and energy costs can be achieved by automating the control of the main parameters of the process using modern control and measurement systems, automation and integrated ACS.

Literary sources are analyzed, where the issues of management of complex multidimensional production processes were raised by Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L., Pilipenko, A. V. and others. In the works of these authors, attention is paid to the relevance of the processes of processing of crystallizing metal by pressure with

the use of hydro-pressure equipment. However from available sources it is clear that the possibility of forming liquid metal prior to the beginning of crystallization has not yet been studied.

Conducted research of physical-mechanical properties of the resultant billet pistons of internal combustion engines, study of the microstructure of the alloy obtained at different modes of crimping. As a result of the research, the purpose and tasks for the design of an automated process control system were determined.

Keywords: *metal forming, adaptive control, multivariate control object, physical-mechanical properties, manufacturing process modeling.*

BIBLIOGRAPHY

1. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems // Analysis and synthesis of nonlinear systems.— SPb.: Science, 2000.— 549 p.
2. Pilipenko, A.V. Adaptive control system of non-stationary technological process of form change. / A.V. Pilipenko // Information systems and technologies. 2011. 4/46. P. 115–119.
3. Korostelev V. F. Theory, technology and automation of injection molding. M.: publishing house "New technologies" 2004, 224 p., ISBN 5–94694–016–3
4. A. Zhilyaev and A. Pshenichnyuk—Oxford, Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials, Cambridge. Int. Science Publishing Ltd. (2011), 326 p.
5. Raibman N. S., Chadeev V. M. building models of production processes. M.: Energy, 1975. P. 374.
6. Alevaskis G., Seborg D. E. An extension of the Smith predictor method to multivariable linear systems containing time delays // Int. J. Control. 1973. V. 17. No. 3. P. 541–551.
7. Pilipenko, A.V. Research and modernization of the mathematical model of hydraulic pressure equipment / A.V. Pilipenko, V. G. Abashin, A. p. Pilipenko // Industrial ACS and controllers. 2013, no. 8, Pp. 26–33.
8. Darst, J. A. simulation of gidroapparat / J. A. Darst / international scientific-technical conference. "Hydraulic engineering. Present and future": Abstracts. Moscow: MG TU im. N. Uh. Bauman, 2004.— P. 28–29.
9. Ang K. H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559–576.
10. J. A. Aseltine, A. R. Mancini, and Sarture, C. W. A survey of adaptive control systems // IRE Trans. on Automatic Control.— 1958.— Vol. AC–6, No. 12.— Pp. 102–108.
11. Bastin G., Gevers M. Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 33, No. 7.— Pp. 650–658.
12. Davydov N. I., Edson O. M., Smirnova O. V. the Determination of the parameters of PID controllers on transient response of the system. // Heat power engineering. 1995. No. 10.
13. Denisenko V. PID controllers: implementation issues. HUNDRED 2008, №1. p. 89
14. Zhivoglyadov V. p. Adaptation in automated process control systems. Frunze: Ilim, 1974. P. 227.
15. Parsheva E. A. Decentralized adaptive control on output of multi-connected objects with delay on state // mechatronics, automation, control. 2005. No. 5. P. 14–22.

Denisov Maxim Sergeevich

FGBOU VPO "Vladimir state University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs"

Department «automation of technological processes»

student

600000, Vladimir, Gorky str., 87

Tel: (4922) 47–98–34, 47–98–61+7 915 798 28 74

E-mail: denisovmaxim90@mail.ru

О.С. КУКОВИНЕЦ, Р.Х. МУДАРИСОВА, А.Ф. САГИТОВА

МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНОВ. ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

Аннотация. Физико–химическими методами анализа изучено взаимодействие модифицированного никотиновой кислотой низко– и высокоэтерифицированных пектинов с катионами меди (II) и кобальта (II). Определены составы комплексов, рассчитаны константы устойчивости и стандартные термодинамические характеристики (ΔH° ; ΔG° ; ΔS°) комплексообразования. Установлено, что взаимодействие высокоэтерифицированных пектинов с катионами биогенных металлов является энтальпийно–энтропийно благоприятным ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ > 0$), тогда как комплексообразование низкоэтерифицированных пектинов контролируется только энтальпийной составляющей ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ < 0$). Выявлено влияние структуры лекарственного соединения в составе полимерного лиганда на ряд физико–химических свойств тройных металлокомплексов. Методами ИК–спектроскопии установлено строение смешаннолигандных металлокомплексов. Обнаружено, что во взаимодействии образцов пектина с катионами металлов (II) участвуют как кислородсодержащие функциональные группы основной цепи полисахарида, так и заместители у ароматического кольца введенной в биополимер органической компоненты.

Ключевые слова: пектин, медь (II), кобальт (II), комплексообразование, константа устойчивости.

Введение

Поиск новых высокоэффективных лекарственных средств на основе комплексов полисахаридов с катионами металлов является одной из актуальных задач в медицинской и фармацевтической промышленности. Известно [1], что металлокомплексы на основе полисахаридов обладают устойчивостью при длительном хранении, отсутствием токсических свойств, избирательностью действия на клеточном и молекулярном уровнях, способностью взаимодействовать с клеточными рецепторами и создавать высокую концентрацию лекарственных веществ в соответствующих органах и тканях.

Среди природных полисахаридов, используемых в качестве матрицы для иммобилизации органических и неорганических фармакофоров, важное место отводится пектинам. Присутствие в их макромолекуле таких групп как гидроксильная, карбоксильная и карбметоксильная способствует образованию гибридных фармакологически активных ассоциатов. Следует отметить, что свойства пектинов, полученных даже от одного источника, могут существенно отличаться. Во многом это зависит от степени этерификации, которая отражает полноту метоксилирования карбоксильных групп молекулы пектина [2, 3].

Поэтому, учитывая актуальность данного направления, целью исследования являлось изучение взаимодействия фармакофорсодержащих низко– и высокоэтерифицированных пектинов (ФП), с катионами меди и кобальта (II) и выявление влияния структуры комплексообразователя и полимерной матрицы на эффективность их взаимодействия. В качестве фармакофора использовалась никотиновая кислота (НК), проявляющая выраженное витаминное, гиполипидемическое и противопеллагрическое действие

Экспериментальная часть

В экспериментах использовали яблочный пектин товарной марки Unipektine XPP 240 с молекулярной массой 21000 Da и степенью этерифицирования (СЭ) 66% и деэтерифицированный пектин (ДЯП) со СЭ 10% и 34%, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «Х.Ч.», никотиновая кислота марки «Ч.д.а.» использовали без дополнительной очистки.

Анализы (измерения и расчеты) выполнены на оборудовании ЦКП «Химия» УфИХ РАН. ИК–спектры образцов записывали на спектрофотометре «Shimadzu» в вазелиновом масле в диапазоне 400 – 4000 см^{-1} . УФ–спектры водных растворов соединений снимали в

кварцевых кюветах толщиной 1 см относительно воды на спектрофотометре «Specord M-40» в области 220–900 нм. Для измерения pH среды использовали pH-метр «АНИОН 4100».

Деэтерификацию проводили следующим образом: 10 г пектина суспендировали в 100 мл 50% этанола и добавляли 1М раствор NaOH в 50% этаноле. Раствор щелочи добавляли порционно по 1–2 мл. Визуальный контроль осуществляли добавлением фенолфталеина. После достижения заданной степени этерификации реакционную смесь подкисляли при интенсивном перемешивании 1М раствором HCl в 50% этаноле до pH 5–6. Готовый образец пектина отделяли от водно-спиртового раствора на фильтре и промывали 300 мл 50% этанола, затем 150 мл 95% этанола и высушивали в вакууме.

Состав образующихся соединений при взаимодействии полисахаридных матриц с сульфатом меди (II)/хлоридом кобальта (II) определяли спектрофотометрическими методами изомолярных серий и мольных отношений [4]. Суммарная концентрация компонентов в изомолярной серии составляла $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л. В сериях растворов с постоянной концентрацией сульфата меди/хлорида кобальта, равной $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, концентрацию полисахарида изменяли от $0.25 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л. Ионную силу поддерживали постоянной, равной 0.1 моль/л (Na_2SO_4 , NaCl «х.ч.»).

Общая методика получения металлокомплексов: к раствору П/П–НК и ДЯП/ДЯП–НК объемом 20 мл прибавляли (50–60 °C) при перемешивании в течение 1.0–1.5 ч раствор 0.1 М NaOH в дистиллированной воде в количестве 0.1 г щелочи на 0.2 г П/ФП, затем добавляли раствор соли двухвалентного металла ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}/\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с концентрацией 0.01 моль/л. Через 30 минут целевой продукт осаждали ацетоном, центрифугировали, промывали этиловым спиртом, затем диэтиловым эфиром и сушили при 40–50 °C под вакуумом [5].

Обсуждение результатов

В последнее время, перспективно получение комплексов катионов металлов с фармакофорсодержащими углеводами, что связано с возможностью создания нового типа биологически активных веществ различного назначения.

Содержание метоксильных групп в макромолекуле – важный показатель пектиновых веществ. Степень этерифицирования меняется в широких пределах и зависит от источника получения и способа извлечения [6]. С целью изучения влияния степени этерификации на свойства образующихся комплексных соединений получены образцы пектинов с различной степенью этерификации [7]. При действии 1М NaOH наблюдалось постепенное падение СЭ пектина с 66% до 10%. Наименьшая степень этерификации достигнута при выдерживании образца пектина в присутствии раствора гидроксида натрия в течение суток. В дальнейшей работе в качестве контрольных выбраны образцы пектинов со СЭ 66% (П), 34% (ДЯП–34), 10% (ДЯП–10).

Взаимодействие модифицированных никотиновой кислотой полисахаридных матриц с катионами металлов изучалось спектральными методами (таблица 1). Видно, что природа фармакофора в составе полисахарида и СЭ пектина оказывают существенное влияние на спектральные характеристики соединений. Добавление растворов биополимеров к растворам солей металлов (II) приводит к изменению светопоглощения: наблюдается батохромный (для Co^{2+}) и гипсохромный (для Cu^{2+}) сдвиги полос поглощения (ПП) компонентов образцов в сочетании с гиперхромным эффектом, что свидетельствует о протекании реакции комплексообразования в исследуемых системах.

Структуру металлокомплексов подтверждали данными ИК-спектроскопии (таблица 1). В ИК-спектрах металлокомплексов наблюдается сдвиг ПП в области 3600–3100 см^{-1} , соответствующего валентным колебаниям гидроксильных групп и смещение максимумов поглощения валентных колебаний эфирной С–О связи пиранозного цикла в области 1140–1013 см^{-1} в низкочастотную область. Кроме того, исчезает ПП валентных колебаний карбонильной группы и появляется характерная ПП для карбоксианиона в области 1700–1600 см^{-1} . В области 1600–1500 см^{-1} наблюдается уменьшение интенсивности, либо

исчезновение полос поглощения, обусловленных колебаниями пиридинового кольца органической компоненты комплекса.

Изменения ИК–спектров металлокомплексов указывают, что во взаимодействии полисахаридных матриц с ионами металла (II) участвуют как кислородсодержащие функциональные группы основной цепи полисахарида, так и заместители у пиридинового кольца введенной в биополимер органической низкомолекулярной компоненты [8].

Таблица 1 – Спектральные характеристики комплексов

Соединение	УФ–спектр, λ_{max}, нм, (200–330 нм), H₂O, pH 7	УФ–спектр, λ_{max}, нм, (330–900 нм), H₂O, pH 7	ИК–спектр, ν, см⁻¹	Внешний вид
П	270	–	3561(OH), 1730 (COOH), 1015– 1138 (C–C, C–O)	бежевый порошок
П–Cu ²⁺	–	805	3600–3100 (OH), 1609 (COO ⁻), 1143–1019 (C–O)	светло– голубой порошок
П–Co ²⁺	–	514	3570 (OH), 1605 (COO ⁻), 1163– 1020 (C–O)	розовый порошок
П–НК	265	–	3600–3200 (OH), 1720–1710 (COOH), 1580 (Ph), 1140–1070 (C–O)	бежевый порошок
П–НК–Cu ²⁺	266	787	3600–3100 (OH), 1612 (COO ⁻), 1590 (Py), 1142–1017 (C–O)	зеленый порошок
П–НК–Co ²⁺	267	526	3337 (OH), 1604 (COO ⁻), 1592 (Py), 1152–1018 (C–O)	темно– розовый порошок
ДЯП–34–Cu ²⁺	–	729	3390–3183 (OH), 1605 (COO ⁻), 1145–1017 (C–O)	бежевый порошок
ДЯП–10–Cu ²⁺	–	728	3392–3187 (OH), 1602 (COO ⁻), 1147–1018 (C–O)	бежевый порошок
ДЯП–34–НК– Cu ²⁺	262	723	3380–3200 (OH), 1614 (COO ⁻), 1556 (Py), 1141–1016 (C–O)	светло– голубой порошок
ДЯП–10–НК– Cu ²⁺	260	720	3384–3208 (OH), 1616 (COO ⁻), 1559 (Py), 1145–1018 (C–O)	светло– голубой порошок

Методом мольных отношений и изомольярных серий определены состав (2:1) и константы устойчивости комплексов полисахаридная матрица–катион металла (II) (таблица 2). Сравнивая данные значения можно видеть, что прослеживается прямая связь между структурой лекарственного соединения, степенью этерифицирования пектина и

устойчивостью образующихся комплексов [9]. Так, введение органической компоненты в биополимер значительно повышает устойчивость металлокомплексов. Данный факт можно объяснить, во-первых, высокой комплексообразующей способностью низкомолекулярной органической компоненты, связанной с полисахаридом и, во-вторых, ее влиянием на надмолекулярную структуру полимерной матрицы.

Установлено, что константы устойчивости увеличиваются с повышением СЭ и снижением температуры реакции. Наибольшую устойчивость проявляет низкоэтерифицированный ДЯП, что связано с более прочным связыванием ионов меди (II) карбоксильными группами ДЯП-10. Устойчивость комплекса П- Cu^{2+} почти в два раза ниже устойчивости ДЯП-10- Cu^{2+} , что обусловлено высокой степенью этерификации пектина, т.е. комплексообразующая способность пектина растет пропорционально числу неэтерифицированных карбоксилов.

Таблица 2 – Константы устойчивости и термодинамические характеристики кобальтсодержащих комплексов

Комплекс	Т, К	$\beta_K 10^3$, л/моль	ΔH°_{298} , кДж/моль	ΔS°_{298} , Дж/моль·К	ΔG°_{298} , кДж/моль
П-Сu (II)	273	1.2±0.1	-9.1±0.1	35.6±0.2	-19.8±0.1
	298	0.6±0.1			
	333	1.0±0.1			
П-НК-Сu (II)	273	200.0±0.1	-21.5±0.1	34.5±0.2	-31.9±0.2
	298	100.0±0.2			
	333	50.0±0.2			
П-Со (II)	273	2.0±0.1	-35.4±0.2	-13.2±0.1	-31.5±0.2
	298	0.7±0.1			
	333	0.2±0.1			
П-НК-Со (II)	273	60.6±0.1	-4.7±0.1	14.1±0.1	-32.9±0.2
	298	51.0±0.2			
	333	45.0±0.2			
ДЯП-10-Сu (II)	273	2.4±0.1	-18.8±0.1	-31.2±0.2	-9.4±0.1
	298	1.3±0.1			
	333	0.7±0.05			
ДЯП-34-Сu (II)	273	1.8±0.1	-27.2±0.1	-33.3±0.2	-17.2±0.1
	298	1.1±0.1			
	333	0.2±0.05			
ДЯП-10-НК-Сu (II)	273	10.5±0.1	-21.9±0.1	-9.1±0.1	-21.6±0.1
	298	3.7±0.1			
	333	3.5±0.1			
ДЯП-34-НК-Сu (II)	273	15±0.1	-10.3±0.1	-43.1±0.1	-23.3±0.1
	298	7.5±0.1			
	333	11.3±0.1			

Обнаружена интересная закономерность между СЭ фармакофорсодержащих ДЯП и устойчивостью образующихся металлокомплексов. Если для высокоэтерифицированного П введение НК способствует значительному повышению устойчивости металлокомплекса в зависимости от температуры, при которой эти комплексы получают, то для низкоэтерифицированных образцов константа устойчивости уменьшается. Так, при введении фармакофора в полисахаридную матрицу для образца П-НК- Cu^{2+} устойчивость возрастает в

50–200 раз, для ДЯП–34–НК–Cu²⁺ – в 8–56 раз, а для системы ДЯП–10–НК–Cu²⁺ – в 3–5 раз. Данные результаты могут быть связаны не только с изменением донорно–акцепторной способности полимерных образцов, но и с различной микроструктурой модифицированных и нативных биополимеров [10].

Экспериментально найдено существенное различие в термодинамике комплексообразования низкоэтерифицированных образцов пектина с катионами металла (II) по сравнению с высокоэтерифицированными образцами (таблица 2). Если комплексообразование ДЯП–10/ДЯП–10–НК и ДЯП–34/ДЯП–34–НК контролируется только энтальпийной составляющей ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ < 0$), то связывание П/П–НК с Cu²⁺ энтальпийно–энтропийно благоприятно ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ > 0$).

Заключение

Таким образом, изучение взаимодействия биогенных металлов с модифицированными биополимерами имеет как фундаментальное, так и практическое значение, поскольку позволяет выявить закономерности протекания процесса комплексообразования, установить роль влияния полимера в изменении разнообразных характеристик комплексов, а также получить новые перспективные материалы, обладающие высокой биологической активностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко Б.Д. Использование полезных свойств пектиновых веществ в медицинской практике // Электротехнология пектиновых веществ. Тезисы докл. 4 н.– т. Сем.–К. 1993. с. 30.
2. Новосельская И.Л., Воропаева Н.Л., Семенова Л.Н., Рашидова С.Ш. Пектин. Тенденции научных и прикладных исследований. // Химия природн. соединений. 2000. №1. С. 3–11.
3. Cafall K.H., Mohnen D. The structure, function and biosynthesis of plant cell wall pectin polysaccharides. Carbohydrate research. 2009. P. 1879–1900.
4. Булатов И.П., Калинин М.И. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. Л.: Химия, 1986. 432 с.
5. Карасева А.Н., Миронов В.Ф., Цепяева О.В. Полиметаллокомплексы пектиновых полисахаридов и их биологическая активность // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2004. Т. 5. № 1. С. 33–35.
6. Ковалёв В.В. Сравнительная оценка металлсвязывающей активности низкоэтерифицированных и высокоэтерифицированных пектинов: диссертация канд.биол. наук. 14.00.25.Владивосток, 2004. 133 с.: ил. РГБ ОД, 61 05–3/875.
7. Girard M., Turgeon S.L., Gauthie J.F. Interbiopolymer complexing between β -lactoglobulin and low- and high-methylated pectin measured by potentiometric titration and ultrafiltration // Food Hydrocolloids. 2002.V. 16. № 6.P. 585–591.
8. Куковинец О.С., Мударисова Р.Х., Сагитова А.Ф., Абдуллин М.И. Взаимодействие яблочного пектина, модифицированного фармакофорами, с катионами меди (II). Журнал общей химии. 2017. Т. 87. Выпуск 4. С. 645–649.
9. Pectin with Low Molecular Weight and High Degree of Esterification Increases Absorption of ⁵⁸Fe in Growing Rats / Kim M. et al. // J. Nutr. 1996. V.126. P. 1883–1890.
10. Куковинец О.С., Мударисова Р.Х., Володина В.П., Тарасова А.В., Мокина А.З., Абдуллин М.И. Комплексообразование яблочного пектина с некоторыми азот- и кислородсодержащими органическими фармакофорами. Химия природных соединений. 2014. № 1. С. 48–51.

Куковинец Ольга Сергеевна
ФГБОУ ВО Башкирский ГУ
доктор химических наук,
профессор
г. Уфа, ул. Мингажева, 100,
тел.: +79174620904
E-mail: Ku47os@yandex.ru.

Мударисова Роза Ханифовна
УфИХ УФИЦ РАН
кандидат химических наук, доцент
г. Уфа, проспект Октября 71
тел.: +7347356066
E-mail: mudarisova@anrb.ru

Сагитова Алина Фаиловна
ФГБОУ ВО Башкирский ГУ
соискатель степени к.х.н.
химического факультета,
г. Уфа, ул. Заки Валиди 32
тел.: +79177806678
E-mail: alinusic93@mail.ru

O.S. KUKOVINETS, R.Kh. MUDARISOVA, A.F. SAGITOVA

METAL COMPLEXES BASED ON PECTIN. PREPARATION AND PROPERTIES

Abstract. *The interaction of nicotinic acid modified low- and high-esterified pectins with copper (II) and cobalt (II) cations was studied by physicochemical methods of analysis. The compositions of the complexes were determined, the stability constants and standard thermodynamic characteristics (ΔH° ; ΔG° ; ΔS°) of complexation were calculated. It was established that the interaction of highly esterified pectins with cations of biogenic metals is enthalpy-entropically favorable ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ > 0$), then as complexation of low-esterified pectins is controlled only by the enthalpy component ($\Delta H^\circ < 0$, $\Delta S^\circ < 0$). The effect of the structure of a drug compound in the composition of a polymer ligand on a number of physicochemical properties of ternary metal complexes was revealed. The structure of mixed ligand metal complexes was established by IR spectrometry. It was found that the interaction of pectin samples with metal (II) cations involves both the oxygen-containing functional groups of the polysaccharide backbone and the substituents on the aromatic ring of the organic component introduced into the biopolymer.*

Keywords: *pectin, copper (II), cobalt (II), complexation, constant of stability.*

BIBLIOGRAPHY

1. Levchenko B. D. Use of useful properties of pectin substances in medical practice // Electrotechnology of pectin substances. Docs thesis. 4 n. – T. SEM.– K. 1993. p. 30.
2. Novoselskaya I.L., Voropaeva N. L. Semenova L.N., Rashidov S.Sh. Pectin. Trends in scientific and applied research // Chemistry is natural. connections. 2000. №1. P. 3–11.
3. Cafall K.H., Mohnen D. The structure, function and biosynthesis of plant cell wall pectin polysaccharides. Carbohydrate research. 2009. P. 1879–1900.
4. Bulatov I.P., Kalinkin M. I. Practical guide to photometric methods of analysis. L.: Chemistry, 1986. 432 p.
5. Karaseva A. N., Mironov V.F., Tsepaeva O.V. Polymetalcomplexes of pectin polysaccharides and their biological activity // Chemistry and computational simulation. Butlers messages. 2004. Vol.5. No. 1. P. 33–35.
6. Kovalev V.V. Comparative evaluation metallovedeniye activity of low-esterified and high-esterified pectins: thesis Cand.Biol. sciences. 14.00.25.Vladivostok, 2004. 133 p.: II. THE RSL OD, 61 05–3/875.
7. Girard M., Turgeon S.L., Gauthie J.F. Interbiopolymer complexing between β -lactoglobulin and low- and high-methylated pectin measured by potentiometric titration and ultrafiltration // Food Hydrocolloids. 2002.V. 16. № 6.P. 585–591.
8. Kukovinets O.S., Mudarisova R. Kh., Sagitova A. F., Abdullin M. I. Interaction of Apple pectin modified by pharmacophores with copper (II) cations. Journal of General chemistry. 2017. Vol. 87. Issue 4. P. 645–649.
9. Pectin with low molecular weight and high degree of Esterification increases the absorption of ^{58}Fe in growing rats / Kim M. et al. // J. Nutr. 1996. V. 126. P. 1883–1890.
10. Kukovinets O. S., Mudarisova R. Kh., Volodina V.P., Tarasova A.V., Mokina A.Z., Abdullin M. I. Complex formation of apple pectin with some nitrogen – and oxygen-containing organic pharmacophores. Chemistry of natural compounds. 2014. №1. P. 48–51.

Kukovinets Olga Sergeevna
Bashkir State University
Dr. of Chemical Sciences, Professor
100, Mingazheva St, Ufa
phone: +79174620904
E-mail: Ku47os@yandex.ru

Mudarisova Roza Khanifovna
Ufa Institute of Chemistry Russian
Academy
of Sciences
PhD of Chemical Sciences, Lecturer
71, Oktyabrya, Ufa
phone: +7347356066
E-mail: mudarisova@anrb.ru.

Sagitova Alina Failovna
Bashkir State University
Candidate of chemical sciences
degree of Chemical Faculty
32, Zaki Validi St., Ufa
phone: +79177806678
E-mail: alinusic93@mail.ru

А.А. МУРАВЬЕВ, А.С. ТАРАПАНОВ

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С КРУГОВЫМ ЗУБОМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПО FDM ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. В статье рассматривается актуальность применения пластмассовых зубчатых колес в машиностроении. Актуализируются их достоинства и недостатки. Показано, что применение кругового зуба у цилиндрических колес значительно повышает изгибную прочность зуба и долговечность работы. Приводится технология создания зубчатых колес методом послойного наплавления, а также полимеры, применяемые в их производстве. Для анализа точности была распечатана партия зубчатых колес на 3D-принтере.

Ключевые слова: моделирование, круговой зуб, зубчатое колесо с круговым зубом, аддитивные технологии, FDM, пластмассовые зубчатые колеса.

Введение.

При изготовлении зубчатых передач выбор материала требует основательного подхода и обоснования. Рассматривая в качестве материала пластмассы, можно отметить, что они уступают по показателю прочности, но в то же время являются легким и хорошо поддающимся обработке материалом, также имеют высокую демпфирующую способность. Вышеперечисленные свойства пластмасс позволяют уменьшить вибрации и шум, потери на трение, массу передачи, издержки на обслуживание зубчатого механизма и производство колес.

Пластмассовые зубчатые передачи используются более 50 лет в сотнях различных видах техники, в том числе: дворники автомобилей, в приводах автомобильных сидений, спидометрах, ротационных насосах, бытовой технике, в приводах электрических дверей, в малом электроинструменте, часах, копировальных устройствах, лазерных принтерах [1].

В некоторых случаях полимерные зубчатые колеса могут заменить металлические, поскольку они легче изготавливаются, требуют минимальной или вообще не требуют постобработки, могут работать с минимальным количеством или отсутствием смазки и, как правило, имеют длительный период времени работы [2].

Основная часть.

Нагрузочную способность цилиндрических колес с прямым зубом из пластмассы можно значительно повысить применение колес с круговым зубом. В таких зубчатых колесах круговой зуб во всех сечениях перпендикулярных оси колеса имеет эвольвентный профиль, расположенный по кривой на развертке делительного цилиндра зубчатого колеса. Такая кривая представляет собой дугу окружности радиуса с центром, расположенным на центральной продольной оси развертки начального цилиндра.

Опираясь на функциональные цели использования зубчатого колеса, выбирается соответствующая конструкция, применение которой будет оптимально, с точки зрения работоспособности, в конкретных условиях эксплуатации. Конструкция должна отвечать требованиям к технологичности в целях экономии материала, унификации оснастки и самих формирующих инструментов, а также минимизации издержек на изготовление. На прочность, надежность и долговечность передачи оказывают наибольшее влияние следующие факторы: применяемый материал, точность изготовления, пространственно-габаритные характеристики зубчатого колеса, расположение и присутствие арматуры. Только при условии обстоятельного исследования особенностей технологических и физико-механических свойств может быть получена такая конструкция, которая будет отвечать необходимым требованиям.

Фрезерование, литье под давление и методы быстрого прототипирования – самые популярные технологии изготовления пластмассовых зубчатых передач [2].

Цилиндрические зубчатые колеса с круговым зубом из пластмасс весьма ограничено используются в механизмах, это во многом определяется себестоимостью их производства и сложностью изготовления. Изготовление цилиндрических зубчатых колес с круговым зубом из полимеров методом литья под давлением из-за необходимости, дорогостоящей пресс-формы и сложности извлечения зубчатого колеса представляется экономически невыгодным.

Аддитивные технологии позволяют быстрее и дешевле получать изделия сложной геометрической формы [3]. Нами предлагается изготовление полимерных зубчатых цилиндрических колес с круговым зубом по технологии FDM (Fused Deposition Modelling).

Принцип создания моделей-прототипов по технологии экструзии FDM заключается в послойной укладке расплавленной до полужидкого состояния полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели, разработанной в системе CAD [4].

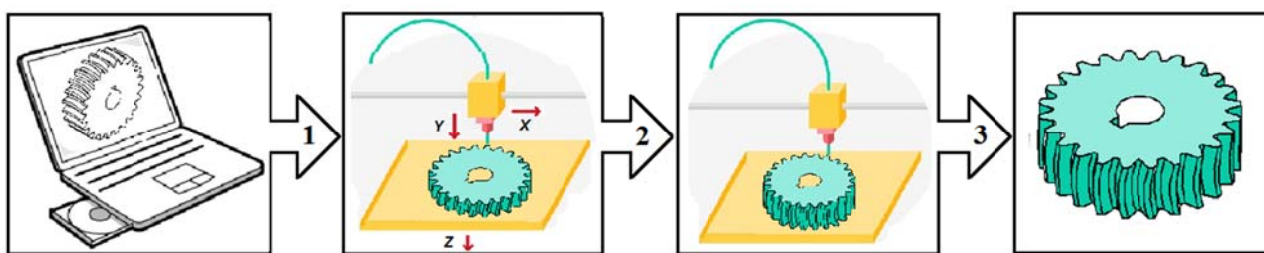


Рисунок 1 – Этапы 3D-печати детали по технологиям FDM

На первом этапе создается CAD модель в специализированном программном обеспечении. На втором этапе осуществляется процесс печати детали. Печатающая головка перемещается по координатам X и Y, платформа на которой расположена печатаемая деталь перемещается по координате Z. Через головку для экструзии подается материал, который подогревается до температуры плавления, каждый слой накладывается на предыдущий. Головка перемещается над платформой построения, накладывая слой за слоем, затем платформа опускается на толщину одного слоя и так происходит до образования конечного изделия. На третьем этапе напечатанная деталь отделяется от платформы и при необходимости подвергается дальнейшей обработке.

Большинство пластиков, используемых для зубчатых передач, являются термопластичными. Двумя наиболее часто используемыми являются полиамиды (нейлоны) и ацетали [1].

Термопластичные пластмассы – эти материалы могут быть мягкими и неопределенно размягченными под воздействием тепла при не слишком высокой температуре. Термин «термопластик» подразумевает, что материал становится пластичным, когда он нагревается [5].

Технология FDM использует те же термопласты, которые применяются в традиционных производственных процессах [6]. Полимеры, применяемые в изготовлении зубчатых колес, показаны в таблице 1.

Наиболее используемыми являются нейлон-6, нейлон-12, полиацеталь. Нейлоны демонстрируют большую прочность и износостойкость, низкий коэффициент трения и химическую стойкость. Полиацеталь обладает прочностью, хорошей устойчивостью к прогибу, имеет низкий коэффициент трения и устойчив к воздействию химически активных веществ [1].

Поскольку в среднем торцовом сечении картина зацепления совершенно аналогична зацеплению обычных эвольвентных профилей, при выборе исходных данных можно руководствоваться расчетами размеров по тем же формулам, что и для прямозубых цилиндрических колес [7].

За основу были взяты расчетные данные, полученные в приложении САПР Компас 3D «Валы и механические передачи 3D».

Таблица 1 – Полимеры, применяемые в производстве зубчатых колес

Название на русском	Название на английском	Аббревиатура на русском	Аббревиатура на английском
Полиамид (нейлон)	Polyamide (nylon)	ПА6, ПА12, ПА46, ПА66	PA6, PA12, PA46, PA66
Полиацеталь (полиоксиметилен)	Polyacetal (Polyoxymethylene)	ПОМ	POM
Полиэфирэфиркетон	Polyetheretherketone	ПЭЭК	PEEK
Полибутилентерефталат	Polybutylene terephthalate	ПБТ	PBT
Полиэтилентерефталат	Polyethylene terephthalate	ПЭТ	PET
Поликарбонат	Polycarbonates	ПК	PC

На первом этапе моделирования используется раздел «Геометрический расчёт». Далее задается число зубьев ведущего и ведомого колеса, выбирается модуль зубьев, ширина зубчатого венца. Расчет ведется в соответствии с ГОСТ 16532–70 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии».

1. Ввод параметров зубчатой передачи		
1.	Число зубьев	24
2.	Модуль, мм	2,5
3.	Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	0
4.	Угол профиля зуба исходного контура	20°
5.	Коэффициент высоты головки зуба исходного контура	1
6.	Коэффициент радиального зазора исходного контура	0,25
7.	Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура	0,38
8.	Ширина зубчатого венца, мм	20
9.	Диаметр вершин зубьев со срезом, мм	67,035

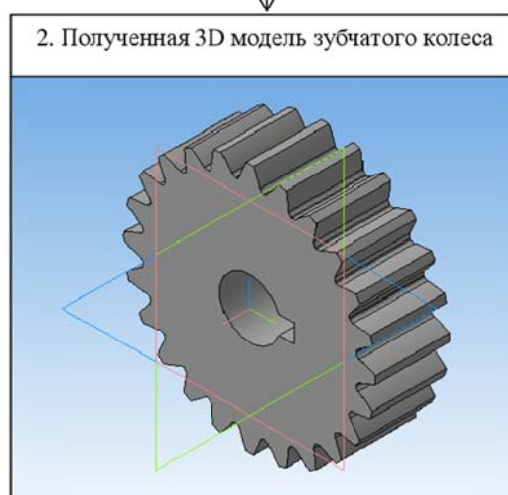


Рисунок 2 – Расчет прямозубого зубчатого цилиндрического колеса

В результате расчета получается 3D модель цилиндрического зубчатого колеса с прямым зубом с модулем 2,5 имеющем 24 зуба, которая будет служить прототипом для построения колеса с круговым зубом, рисунок 2 (б).

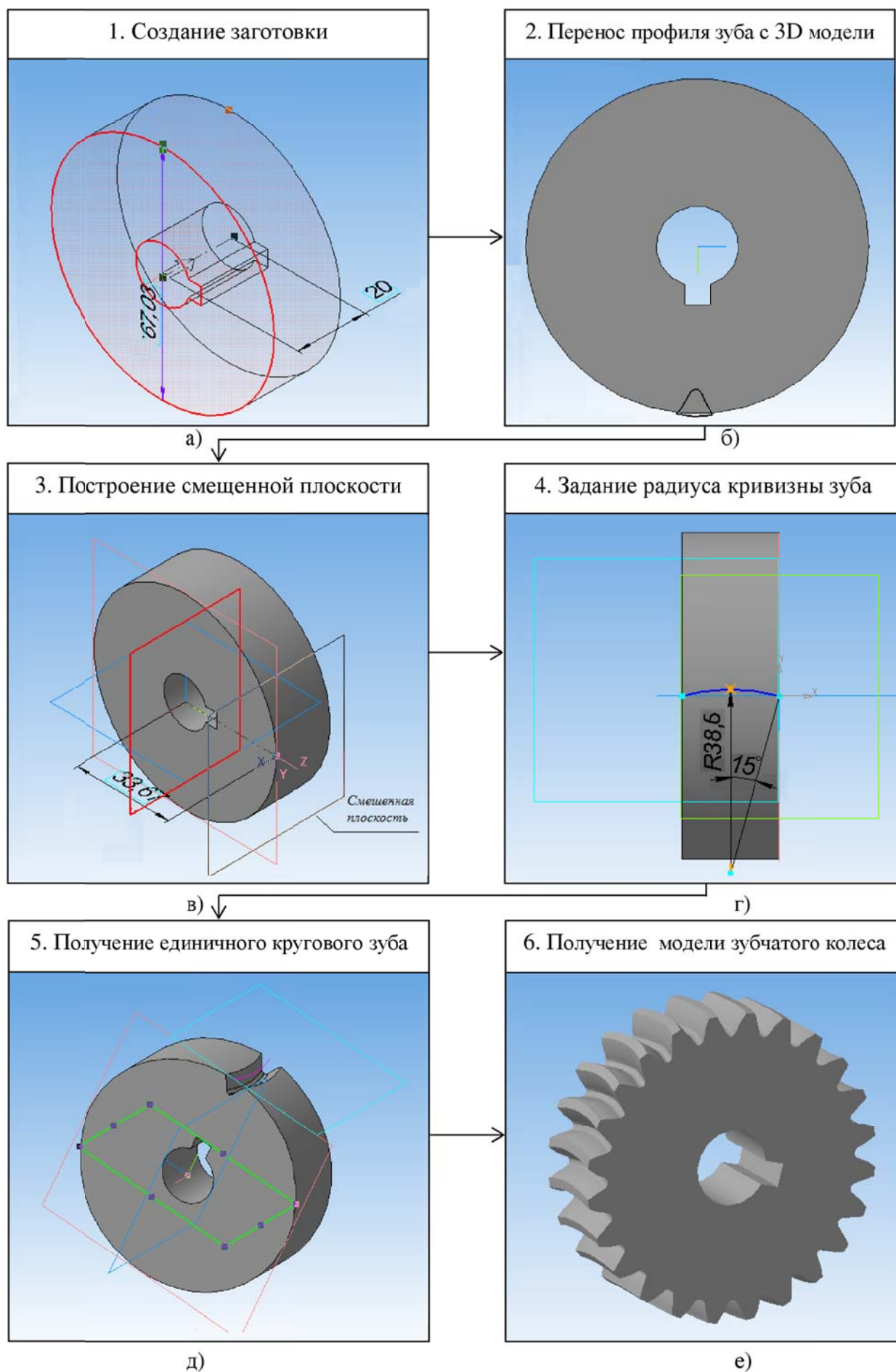


Рисунок 3 – Этапы построения 3D модели цилиндрического зубчатого колеса с круговым зубом

Дуга кривизны зубьев связана с диаметром заготовки, высотой зубьев и длиной зубьев, рисунок 3 (а). Поскольку дуга кривизны зубьев соответствует дуге окружности формообразующей при механической обработке, то необходимо использовать комплект режущих головок состоящей из одной головки для вогнутой стороны зубьев, а другой – для вогнутой с одинаковым диаметром режущей части [8]. Это значительно удорожает технологию получения кругового зуба при механической обработке.

Для аддитивного метода формообразования это является не существенным. Вместе с тем условия формообразования зубчатых колес с круговым зубом при механической обработке полностью определяет конфигурацию кругового зуба при аддитивном формообразовании.

Важным является процесс определения возможного радиуса кругового зуба. По рекомендации, опубликованной в патенте №2070487, величина угла определяющей конфигурацию кругового зуба можно определить, рисунок 3 (г) в пределах $\cong 15^\circ$ [9]. Это дает возможность рассчитать радиус кругового зуба при известной ширине колеса.

После получения модели, рисунок 3 (е) партия зубчатых колес была распечатана на 3D-принтере по технологии FDM, рисунок 4.



Рисунок 4 – Полученный образец зубчатого колеса

Заключение.

Таким образом, были рассмотрены особенности моделирования цилиндрического зубчатого колеса с круговым зубом в САПР Компас 3D с применением приложения «Валы и механические передачи 3D». Данный метод является наиболее простым и доступным при моделировании цилиндрических зубчатых колес с круговым зубом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gear materials, properties, and manufacture/ edited by J.R. Davis. ASM International., 2005. – 339 p.
2. Kapil Gupta, Rolf F. Laubscher, Neelesh Kumar Jain. Advanced Gear Manufacturing and Finishing: Classical and Modern Processes. – Academic Press, 2017. – 240 p.
3. Муравьев, А.А. Обоснование применения и эффективность аддитивных технологий в машиностроении / А.А. Муравьев, А.С. Тарапанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 1. – С. 84–90.
4. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – СПб.: Питер, 2016. – 400 с.
5. Болтон, У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник / У. Болтон. – М.: Додэка XXI, 2004. – 320 с.
6. FDM Technology for 3D Printing | Stratasys [Электронный ресурс] URL: <http://www.stratasys.com/fdm-technology> (дата обращения 08.05.2018).
7. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач/Под ред. И.А. Болотского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
8. Сидоренко А.К. Зубчатая передача 70 НКМЗ. – М.: Машиностроение, 1984. – 80 с.

9. Патент 2070487 РФ. Способ формообразования арочных зубьев цилиндрических зубчатых колес и станок для его осуществления / А.К. Сидоренко, Н.А. Лобанов, Н.И. Аристархов. Опубл. 20.12.1996.

Муравьев Андрей Александрович
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
Аспирант кафедры машиностроения
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
E-mail: andrei-20101@yandex.ru

Тарапанов Александр Сергеевич
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
кафедры машиностроения
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
E-mail: tarapanov@rambler.ru

A.A. MURAVEV, A.S. TARAPANOV

PECULIARITIES OF SOLID MODELING CYLINDRICAL GEAR WITH CIRCULAR TOOTH FOR PRODUCTION BY FDM TECHNOLOGY

Abstract. *The article considers the relevance of the use of plastic gear wheels in engineering. Their advantages and disadvantages are actualized. It is shown that the use of a circular tooth in cylindrical wheels significantly increases the flexural strength of the tooth and the durability of the work. The technology of creating gear wheels by the method of layer-by-layer fusing, as well as polymers used in their production, is given. For accuracy analysis, a batch of gear wheels was printed on a 3D printer.*

Keywords: *modeling, a circular tooth, a gear wheel with a circular tooth, additive technologies, FDM, plastic cogwheels.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gear materials, properties, and manufacture/ edited by J.R. Davis. ASM International., 2005. – 339 p.
2. Kapil Gupta, Rolf F. Laubscher, Neelesh Kumar Jain. Advanced Gear Manufacturing and Finishing: Classical and Modern Processes. – Academic Press, 2017. – 240 p.
3. Muravev, A.A. Substantiation of the application and effectiveness of additive technologies in machine building / A.A. Muravev, A.S. Tarapanov // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. – 2017. – No. 1. – P. 84–90.
4. Shishkovsky I.V. Fundamentals of high-resolution additive technologies. – St. Petersburg: Peter, 2016. – 400 p.
5. Bolton, U. Structural materials: metals, alloys, polymers, ceramics, composites. Pocket Guide / W. Bolton. – Moscow: Dodeca XXI, 2004. – 320 p.
6. FDM Technology for 3D Printing | Stratasys [Electronic resource] URL: <http://www.stratasys.com/fdm-technology> (circulation date 08.05.2018).
7. Handbook on the geometric calculation of involute gear and worm gears, Ed. I.A. Bolotsky. – 2 nd ed., Pref. and additional. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – 448 p.
8. Sidorenko A.K. Gear train 70 NKMZ. – M.: Mechanical Engineering, 1984. – 80 p.
9. Patent 2070487 of the Russian Federation. Method of shaping the arched teeth of cylindrical gears and the machine for its implementation / A.K. Sidorenko, N.A. Lobanov, N.I. Aristarchus. Published. 12.20.1996.

Muravev Andrei Aleksandrovich
OSU named I.S. Turgenev, Orel
Post-graduate student of the
Machine Building Department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: andrei-20101@yandex.ru

Tarapanov Aleksander Sergeevich
OSU named I.S. Turgenev, Orel
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Machine Building Department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: tarapanov@rambler.ru

А.К. СУХОВ, А.В. ДОЛОГЛОНЯН

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ В НАЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТАХ

Аннотация. В статье приводится история возникновения радоновой проблемы и ее влияние на здоровье человечества на базе материалов Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) при ООН и последних научных достижений по естественному радиоактивному фону. Объектом исследования в статье стал радиоактивный газ радон. В результате всесторонних исследований природы возникновения радоновой проблемы даются определенные практические рекомендации по уменьшению влияния радиоактивности радона и его ДПР как на производстве, так и в быту на здоровье человека, и ставятся конкретные задачи для экологической науки по решению этой проблемы.

Ключевые слова: радиоактивность, радон, строительные материалы, эжекторные установки.

Введение.

Основную часть облучения население Земного шара получает от источников радиации. Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения попадают на поверхность Земли из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о внешнем облучении. Если радиоактивные вещества находятся в воздухе, которым дышит человек, в пище или воде, они могут попасть внутрь организма человека. Такой способ облучения называют внутренним.

Лишь недавно ученые поняли, что наиболее весомым из всех естественных источников радиации является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон, который в 7,5 раза тяжелее воздуха (свойства радона представлены в таблице 1).

Таблица 1 – Некоторые физические свойства радона

Наименование параметра	Численное значение
Температура затвердевания, °С	–71
Температура кипения, °С	–65
Максимальная растворимость в 100 мл воды при:	
0 °С, гр.	5,05
25 °С, гр.	2,22
50 °С, гр.	1,3
Радиоактивность максимального растворенного радона в 100 мл воды:	
0 °С, Бк/л	$2,9 \times 10^{16}$
25 °С, Бк/л	$1,26 \times 10^{16}$
50 °С, Бк/л	$0,73 \times 10^{16}$

В природе радон встречается в двух основных формах: в виде радона–222, члена радиоактивного ряда, образуемого продуктами распада урана–231, и в виде радона–220, члена радиоактивного ряда тория–232. Вклад в суммарную дозу облучения радона–222 в 20 раз больше, чем радона–220. Так как это газы, они поступают в атмосферу и распадаются в ней с образованием дочерних продуктов распада (ДПР), которые, являясь твердыми веществами, образуют радиоактивные аэрозоли.

Аэрозоли попадают в легкие животных и человека, накапливаются в них и создают существенные дозы внутреннего облучения человека – альфа–излучатели. ДПР тем самым создают более 90% доз облучения по сравнению с радонами–222 и 220. На рисунке 1

изображена цепочка распада радия, радона и ДПР [1, 2].

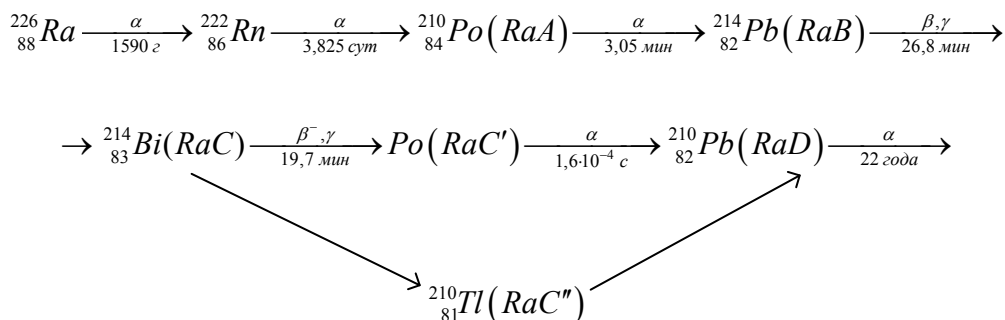


Рисунок 1 – Цепочка распада радона и ДПР

Основная часть.

Жертвы губительного воздействия радона были известны еще в средние века, хотя о самом радоне тогда ничего знать не могли, ибо этот газ не имеет ни запаха, ни цвета, ни вкуса. Рабочие рудников в горных областях на юге Германии умирали от загадочной болезни, называемой в те времена «загадочной чахоткой» [3]. Человек, попадавший в плохо вентилируемый забой, не ощущая подозрительных запахов, минут через 10–20 оказывался поражен тяжелой одышкой и сильным сердцебиением и вскоре терял сознание. Если он после этого не оказывался на чистом воздухе, то часто наступала смерть. Основоположник горной науки Георгий Агрикола, отчаявшись найти причину болезни, заключил, что в этих рудниках были потревожены «горные духи», которые и насылают гибель на людей. Нужно заметить, что эти европейские рудники в начале века были первыми источниками добычи урана и радия.

В 1937 г. Людвиг Телеки выяснил, что это горняцкая болезнь есть не что иное, как один из видов рака легких – бронхиальная карцинома, от которой умирало 50% рабочих, работающих в рудниках Южной Германии. Как выяснилось, концентрация радона в воздухе этих рудников была 40000 Бк/м^3 .

В органы дыхания за сутки попадает около 20 млн атомов радона, а при высоком радоносодержании – более миллиарда. Радон хорошо растворяется в крови и лимфе и поэтому содержание его в единице объема человеческого тела достигает примерно 50% от содержания в окружающем воздухе.

В начале 70-х годов непосредственными исследованиями было установлено, что радон концентрируется в гипофизе и в коре надпочечников. Гормоны гипофиза играют важную роль регуляции функций сердца, нервной системы, желудка, печени и контролируют обмен веществ. Кора надпочечников вырабатывает такие гормоны, как адреналин и норадреналин, которые, в частности, управляют способностью организма к адаптации в изменяющихся условиях, определяют жизнестойкость при неблагоприятных воздействиях.

Как доказывают многочисленные экспериментальные исследования, изменения концентрации радона в атмосфере велики – ни одна из газовых компонент в последней не меняется в таких широких пределах. Согласно приводимым в зарубежной литературе данным, во многих регионах Земного шара концентрация радона может изменяться в десятки и сотни раз. Так, в Лондоне концентрация радона под открытым небом достигала 1500 Бк/м^3 при среднем уровне около 5 Бк/м^3 , а на знаменитых курортах в Ницце и Каннах концентрация радона часто увеличивается в 20 раз.

Российский ученый А.Э. Шемьин-Заде резкие изменения концентрации радона в атмосфере назвал «радоновыми бурями» и доказал периодичность их возникновения. Они совпадают с днями активных периодов геомагнитных бурь. Последние, согласно теории ученого, вызывают магнитно-стрикционное сжатие горной породы в меняющемся магнитном поле, тем самым «выжимают» радон из микропор горных пород. На Земле геомагнитные бури имеют 27-дневную повторяемость, которая связана с вращением Солнца вокруг собственной оси.

На радон до 70-х годов, в смысле его глобального вреда для здоровья, внимания не обращали. Все мы со школьной скамьи усвоили, что радон – инертный газ без цвета, запаха, ни в какие химические реакции не вступает.

Проводниками радона под землей являются региональные разломы, заложенные в допалеозойское время, и разломы, активизированные в мезо–кайнозойское время, с помощью которых радон появляется на поверхности земли и частично концентрируется в рыхлых слоях пород земли.

Из регионов России потенциально опасных в этом смысле выделяют Западную Сибирь (Белокуриха, Новосибирск), Забайкалье (Краснокаменск), Северный Кавказ (Пятигорск) и Северо–западные регионы России.

Самым мощным источником поступления естественных радионуклидов, а в частности радона, в атмосферу являются энергетические предприятия, работающие на органическом топливе – угле, сланце, нефти.

В воду радон попадает из окружающей почвы, а также гранитов, базальтов, песка, с которыми соприкасаются водоносные слои. Поэтому концентрация радона в воде зависит от концентрации материнских элементов в горных породах, омываемых ею.

Подземные воды, залегающие недалеко от поверхности, обычно, имеют концентрацию радона меньше 50 Бк/л. В поверхностных водах концентрация радона, как правило, не превышает 2–5 Бк/л. По санитарным нормам РФ допускается содержание радона в воде до 60 Бк/л.

Самый простой способ снижения концентрации радона в воде – это кипячение или использование фильтров из активированного угля, который называется адсорбцией.

Наибольшую опасность представляет поступление радона вместе с водяным паром при пользовании душем, ванной и т.п. Так при обследовании ряда домов в Финляндии, было выяснено, что концентрация радона в ванной комнате в 40 раз выше, чем в жилой.

Вместе с тем, радон широко применяется в медицине. Альфа–излучение происходящее при применении курортной радоновой терапии освобождает организм от «сломанных» генов и служит не только таким прекрасным «очистителем» в профилактике онкологических болезней, но и своевременно ликвидирует функциональные нарушения, т.е. болезней.

При прохождении курсового лечения происходит накопления радона в органах центральной и периферической нервной системах и жировых тканях. Таким образом накопления радона стимулируют выработку эндорфинов, или так называемых «гормонов счастья». Эндорфины отвечают за хорошее самочувствие человека, хорошее настроение, и за безупречный обезболивающий эффект.

Радон применяется в лечении следующих основных заболеваний:

- болезней кожи;
- гинекологических проблем;
- болезней эндокринной системы, и желудочно–кишечного тракта;
- проблем с системой кровообращения;
- болезней опорно–двигательного аппарата.

В коже после принятия радоновых ванн меняется содержание гистамина и серотонина, которые выделяются из тучных клеток и несут ответственность за изменение тонуса сосудов, воздействуя на сосудистые альфа– и бета–рецепторы.

Для радоновых ванн предусмотрены следующие концентрации радона:

- очень слабые – 185–750 Бк/л;
- слабые – 750–1500 Бк/л;
- средние – 1500–3000 Бк/л;
- высокой концентрации – 3000–4400 Бк/л.

Толчком к началу решения радоновой проблемы послужил энергетический кризис 70-х годов, когда в странах Скандинавии в результате мероприятий по экономии тепла в жилых домах параллельно увеличилась заболеваемость раком легких. Данный эффект был связан с увеличением концентрации радона в воздухе жилых помещений из–за резкого уменьшения

обновления теплого воздуха [4]. После проведения широкомасштабных исследований по наличию радона в сотнях тысяч жилых домов в США, Канаде, Швеции оказалось, что риск заболеть раком легких у жителей этих домов такой же, как и у тех людей, которые находились непосредственно в Чернобыле или его окрестностях в первые дни после катастрофы [5]. Выяснилось, что основными источниками радона в воздухе жилых помещений являются:

- земля, если дом стоит на богатом радиоактивными элементами грунте;
- строительные материалы домов;
- использование природного газа;
- родниковая и артезианская вода.

В начале 80-х годов в Европе и США было узаконено нормирование радона и его ДПР в воздухе жилых и служебных помещений. В России серьезно проблемой радона стали заниматься с конца 80-х годов. В 1999 г. были приняты строительные нормы, регламентирующие радиационный контроль в строительстве. Предельные величины концентрации радона в воздухе можно найти в следующих нормативных документах: НРБ–99/2009 и ОСПОРБ–99/2010. Как указывают нормативы, в жилых и непроизводственных помещениях не должно быть больше 200 Бк/м^3 и не больше 100 Бк/м^3 для новых строений, вводимых в эксплуатацию. Если эти значения не будут выдержаны, то радиационная безопасность проживания в этих помещениях не гарантируется. Были установлены допустимые уровни радиационных параметров техногенно усиленных источников природного происхождения (суммарная удельная активность естественных радионуклидов в строительных материалах – ЕРН; мощность экспозиционной дозы внешнего гамма-излучения в помещениях; среднегодовая эквивалентная равновесная концентрация радона–222 в воздухе помещений – ЭРК) в строительстве и порядок проведения их контроля. С 1998 г. регламенты, направленные на уменьшение доз хронического облучения человека от повышенных источников, были внесены в Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2010). В том же 1999 г. введены в действие новые Государственные строительные нормы РФ, в которых более детально рассмотрены вопросы защиты населения от вредных факторов естественного происхождения, с которыми человек вынужден соприкасаться ежедневно на работе и дома.

Большая работа для решения радоновой проблемы в экологии была выполнена российскими геофизиками, которые выполнили карту радоноопасных районов России [6].

Начиная с 1994 г., радиационным контролем в г. Севастополь на государственном уровне занимается Радиологическая лаборатория городской санитарно–эпидемиологической станции. В результате обследований железобетонных и блочных жилых домов, построенных в городе, объемная активность радона составляет $12 - 30 \text{ Бк/м}^3$ при норме 200 Бк/м^3 . В табл. 2 представлены данные радиационных характеристик основных строительных материалов и сырья, использующихся строительными организациями в Крыму [7].

Исходя из вышесказанного, для решения радоновой проблемы изначально необходимо:

1) развернуть в г. Севастополе и городах Крыма систему радиоэкологического мониторинга, которая должна состоять из мобильных и стационарных средств контроля (мобильные средства включают в себя автомобильный и водный комплексы; стационарные средства должны быть интегрированы в режимную сеть наблюдения: сеть стационарных постов контроля воздушного и водного бассейна, сеть автоматических измерителей радиационного фона (ИРФ); ИРФ должны быть размещены на автомагистралях, крупных предприятиях, в местах массовых миграций населения с учетом планомерного охвата всех административных делений;

2) согласно руководящих документов по радиационной безопасности (РБ) при выборе площадки для строительства жилого помещения допустимая средневзвешенная по площади (в пределах плана здания) значение плотности потока радона превышает $80 \text{ мБк/(м}^2 \text{ с)}$ должна предусматриваться специальная противорадоновая защита здания, проектируемая специальными организациями, строительство дошкольных общеобразовательных,

дошкольных и лечебных учреждений рекомендуется производить на участках, где плотность пока радона из грунта не превышает 40 мБк/(м² с), кроме того, при возведении нового здания требуется производить расчет радоновой проницаемости его фундамента [8], если в результате полученные значения радоновой активности превышают, указанные выше нормы, принимают меры, направленные на увеличение сопротивления радонопроницаемости фундамента с помощью специальных газоизоляционных мембран, которые обладают низким коэффициентом диффузии радона; при строительстве здания необходимо организовать радиационный контроль строительных материалов и сырья, испарения радона из гранул строительного материала – эксхалация зависит от содержания в них радия, плотности, пористости, толщины стен и т.д.;

3) при начале строительства жилых и производственных помещений (чтобы уложиться в допустимую санитарную норму по содержанию в воздухе радона) выполнить следующее:

– организовать радиационный контроль строительных материалов и сырья в регионе. Не применять наиболее неблагоприятные строительные материалы по выходу радона–222 в жилых помещениях: глинозем, силикаты, шлак, кирпич из красной глины, ракушечник и т. д. (таблица 2);

Таблица 2– Радиационные характеристики основных стройматериалов и сырья, используемых в г. Севастополе

№ п/п	Наименование стройматериалов и сырья	Удельная активность, Бк/кг			Суммарная взвешенная активность
		Ra–226	Th–232	K–40	
1	Песок строительный	10,49	6,454	232,0	36,28
2	Известковый раствор	17,88	14,450	274,7	51,55
3	Кирпич красный строительный	31,71	35,210	703,1	171,10
4	Щебень	10,16	3,890	208,9	30,90
5	Алебастр	9,34	7,410	108,4	22,38
6	Кирпич керамический	29,80	34,510	802,1	151,90
7	Цемент	40,82	19,020	254,6	91,85
8	Бетонный раствор	26,71	9,930	101,2	37,56
9	Плитка керамическая облицовочная	47,99	21,330	426,9	105,70
10	Граншлак	2,35	1,707	650,0	58,23
11	Столярные изделия	3,21	4,030	226,8	28,18
12	Камень строительный «инкерманский»	2,46	3,090	248,6	35,32
13	Камень строительный «ракушечник»	17,18	10,800	219,9	53,80
14	Отсевы	13,50	5,160	271,8	35,11
15	Окатыши	27,52	22,770	457,8	101,30
16	Глина строительная	25,81	42,810	575,2	121,10
17	Кирпич строительный шлакоблок	21,51	14,430	238,6	67,83
18	Порошок «инкерманский»	3,50	3,970	190,8	23,05
19	Шпаклевка	11,27	1,630	94,27	21,42

– в соответствии с Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 № 3–ФЗ и Постановлением правительства РФ от 28.01.1997 № 93 «О порядке разработки радиационно–гигиенических паспортов организаций и территорий», от 16.06.1997 организовать радиационно–гигиеническую паспортизацию территорий;

– организовать изоляцию подвалов зданий и перекрытий между подвалом и первым этажом от почвенного воздуха; для этого по монолитно–фундаментной плите и по внутренней поверхности стен подвала устанавливается герметичный противорадоновый ковер;

– при вводе в эксплуатацию новых зданий обязателен контроль помещений по радону;

– для уменьшения концентрации радона–222 в помещении необходимо: стены комнат покрасить краской в три слоя, либо отштукатурить, либо наклеить плотные обои;

герметизировать жилые помещения от подвалов; организовать постоянную естественную или принудительную вентиляцию воздухом.

В [9] даны рекомендации крайних параметров вентиляции помещений от радона искорости очистки ДПР на фильтре.

Если при строительстве жилья и производственных помещений проектант использует вышеперечисленный арсенал средств для снижения Содержания радона-222 и его ДПР, то существует множество производственных объектов, расположенных под землей (пещеры, шахты, хранилища, объекты гражданской обороны, винные подвалы, подземные помещения АЭС, ГРЭС и т.д.), в которых этот арсенал средств не используется. Газ радон, который в 7,5 раз тяжелее воздуха, накапливается вместе с ДПР и представляет реальную угрозу для обслуживающего персонала и создает экологическую проблему. Например, содержание радона в подземных галереях для выдержки вина Инкерманского завода марочных вин достигает 350 Бк/м³[10].

Для обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала в вышеназванных объектах необходимо использовать индивидуальные респираторы, которые задерживают до 80% ДПР.

На базе физико-химических свойств радона (хорошая растворимость в воде, его ДПР – радиоактивные аэрозоли) создана водо-воздушная эжекторная установка (ВВЭЖУС), которая способна эффективно решать указанную экологическую проблему для обслуживающего персонала [11]. В настоящее время ВВЭЖУС готовится к проведению комплексных испытаний в подземных штольнях для хранения вина с естественной циркуляцией воздуха.

Заключение.

1. Согласно текущей оценке специальной комиссии ООН, газ радон-222 вместе с ДПР составляет примерно 3/4 индивидуальной годовой дозы, получаемой человеком от земных источников радиации.

2. Газ радон концентрируется в воздухе внутри помещений лишь тогда, когда помещения изолированы от внешней среды. Радон внутрь помещения поступает:

- «просачиваясь» через фундамент и полиз грунта;
- высвобождаясь из конструкционных и строительных материалов помещения;
- при использовании природного газа, родниковой и артезианской вод.

3. Для глубокого изучения радоновой проблемы и широкого контроля за радоном и его ДПР необходимо продолжить совершенствование соответствующих измерительных приборов.

4. Для обеспечения экологических условий работы обслуживающего персонала в подземных сооружениях, где нет соответствующей вентиляции, необходимо расширить внедрение установок ВВЭЖУС для объемного поглощения радона-222 и его ДПР.

5. Проблему радона надо решать на государственном уровне, как национальную проблему экологической нации, с выделением средств на исследования, широкое внедрение результатов исследований и подготовку соответствующих специалистов.

7. В успешном решении радоновой проблемы лежит здоровье нации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1996. – 258с.
2. Краткий курс радиохимии/ под ред. А.В. Николаева. – М.: Высшая школа, 1969. – 236с.
3. Шемьин-Заде Р.Э. Есть ли в доме «горный дух» // Информ. бюллетень. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. – С. 29–33.
4. Радиация, дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988. – 79с.
5. Кольтовер В.К. Еще раз о радиоактивности в нашем доме // Информ. бюллетень. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. – С. 72–75.
6. Тихонов М.Н. Радоновая радиация: источники, дозы и нерешенные вопросы //Экология промышленного производства, 2008, вып. 1, с. 35–51
7. Сборник научных работ специалистов санитарно-эпидемиологической службы города Севастополя. – Севастополь, 1999. – Вып. 6. – С. 77–81.

8. ЖКХ РФ. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадиационной защиты. – М, 2016.
9. Афанасьев А.В., Ковалев Н.К., Мясоедов Г.П. Модель равновесных концентраций радона и дочерних продуктов его распада в вентилируемых помещениях // Сб.научн. тр.СИЯЭиП– Севастополь: СИЯЭиП, 2000. – Вып. 3. –С. 36–44.
10. Акт радиационного обследования подземных штолен выдержки вина Инкерманского завода марочных вин. – Севастополь: ГорСЭС, 1998.
11. Пат. 255469А (Украина). Способ охлаждения атмосферным воздухом воды системы оборотного водоснабжения АЭС, ТЭС и других промышленных предприятий и модульная эжекторно–вихревая установка для его осуществления / А.К. Сухов. –Опубл. в Б.И., 1998. – №6.

Дологлонян Андрей Вартазарович

ФГБНУ Институт природно–технических систем
Российской Федерации, г. Севастополь
Кандидат технических наук, старший научный
сотрудник
E–mail: dologlonyan@hotmail.com

Сухов Андрей Константинович

ФГБНУ Институт природно–технических систем
Российской Федерации, г. Севастополь
Доктор технических наук, главный научный
сотрудник
E–mail: dologlonyan@hotmail.com

A.K. SUKHOV, A.V. DOLOGLONYAN

RESEARCH OF GEOMETRICAL AND PHYSICAL PARAMETERS INFLUENCE OF THE DRIFT BOAT ON ITS SPEED

Abstract. *History of emergence of a radonic problem and its influence on health of mankind on the basis of materials of Scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) at the UN is given in article and the last scientific achievements on a natural radioactive background. The radioactive gas radon became a research object in article. As a result of comprehensive investigations of the nature of emergence of a radonic problem certain practical recommendations about reduction of influence of radioactivity of radon and its DPR both on production, and in life on health of the person are made, and specific objectives for ecological science according to the solution of this problem are set.*

Keywords: *radioactivity, radon, construction materials, ejector installations.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ivanov V.I. Kursdozimetrii. – М.: Atomizdat, 1996. – 258 s.
2. Kratkijkursradiohimii / pod red. A.V. Nikolaeva. – М: Vysshayashkola, 1969. – 236 s.
3. SHemi–Zade R.EH. Est li v dome «gornyj duh» // Inform. byulleten. – М.: CNII–atominform, 1992. – S. 29–33.
4. Radiaciya, dozy, ehffekty, risk. – М: Mir, 1988. – 79 s.
5. Koltover V.K. Eshcheraz o radioaktivnosti v nashem dome // Inform. byulleten. – М.: CNIIatominform, 1992. – S. 72–75.
6. Tihonov M.N. Radonovayaradiaciya: istochniki, dozy i nereshennyyevoprosy //EHkologiyapromyshlennogoproizvodstva, 2008, vyp. 1, s. 35–51
7. Sborniknauchnyhrabotspecialistovsanitarno–ehpidemiologicheskosluzhby go–rodaSevastopolya. – Sevastopol, 1999. – Vyp. 6. – S. 77–81.
8. ZHKKH RF. Zdaniyazhilye i obshchestvennye. Pravilaproektirovaniyaprotivoradia–cionnojzashchity. – М, 2016.
9. Afanasev A.V., Kovalev N.K., Myasoedov G.P. Model ravnovesnyhkonzentracijradona i dochernihproduktov ego raspada v ventiliruemyhpomeshcheniyah // Sb. nauchn. tr. SIYAEHiP – Sevastopol: SIYAEHiP, 2000. – Vyp. 3. – S. 36–44.
10. Aktradiacionnogoobsledovaniyapodzemnyhshtolenvyderzhkivina Inkerman–skogozavodamarochnyhhvin. – Sevastopol: GorSEHS, 1998.
11. Pat. 255469А (Украина). Sposob ohlazhdeniya atmosferynym vozduhom vody sistemy oborotnogo vodosnabzheniya AEHS, TEHS i drugihpromyshlennyhpredpriyatij i modul–nayaehzhektorno–vihrevayaustanovkadlya ego osushchestvleniya / A.K. Suhov. – Opubl. v B.I., 1998. – № 6.

Dologlonyan Andrey Vartazarovich

FSBSI Institute of nature and technical systems of
Russian Federation, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
E–mail: dologlonyan@hotmail.com

Suhov Andrey Konstantinovich

FSBSI Institute of nature and technical systems of
Russian Federation, Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher
E–mail: dologlonyan@hotmail.com

И.А. ВАСИЛЬЕВ, Е.С. ЛЮМИНАРСКАЯ, К.В. СЕЛИВАНОВ

ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК СПОСОБ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ГЕОГРАФИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Аннотация. *Повышение уровня жизни населения требует увеличения потребления электроэнергии. Проблема электрификации удалённых, географически изолированных малонаселённых территорий России, остаётся актуальной в настоящее время. Актуальности данной проблеме добавляет тот фактор, что значительная часть производственного комплекса, в том числе добывающего сырьевого комплекса РФ, располагаются вне территорий централизованного электроснабжения. Для обеспечения электропотребителей данных областей требуется решение сложных нетривиальных задач по разработке новых методов электрогенерации и электроснабжения. Истощаемость классических энергоресурсов, проблемы с экологией и климатом вынуждают человечество искать новые источники электроэнергии и постепенно переходить на использование возобновляемых источников электроэнергии. Текущее техническое развитие не даёт возможности полностью обеспечить удалённых электропотребителей за счёт одного способа электрогенерации на ВИЭ, однако путём гибридизации нескольких генерирующих мощностей, работающих на различных ВИЭ, становится возможным значительно сократить использование углеводородных энергоносителей или полностью отказаться от них при электрификации удалённых электропотребителей небольшой мощности.*

Ключевые слова: *Возобновимый источник энергии, гибридная энергетика, электрогенератор, солнечная батарея.*

Введение.

Окружающий нас мир поистине удивителен своим многообразием. Баланс и совместное существование живой и неживой природы уникальны и непостижимы в полной мере человеческому разуму. Совместимость и гибридизации различных видов материальной составляющей нашего мира изучаются с давних времен и представлены широким спектром работ по биологии, зоологии и механике. Физические преобразования и их переход из одной формы физической сущности в другую путем преобразования или слияния различных видов сопровождаются поглощением или выработкой различных форм энергии. Преобразование и переход друг в друга физических сущностей и различных видов энергии – неуловимое и завораживающие для стороннего наблюдателя действие. Однако за внешней работой и притягательностью процессов преобразования и переходов между физическим состоянием энергии сосредоточены значительные трудности для современной науки ввиду определения момента качественного преобразования. Отдельную сложность составляют системные процессы, в которых участвуют несколько различных видов поставщиков энергии, или процессы, результатом которых является выработка различных видов энергии. Любая консолидированная энергия стремится как можно быстрее перейти в другой вид энергии или рассеяться в окружающем пространстве; тем самым уменьшить свой потенциал, что значительно усложняет генерацию электроэнергии из возобновимых источников электроэнергии (ВИЭ) ввиду их рассеянности малой энергоёмкости, и в очередной раз подтверждает закон сохранения энергии.

Основная часть

Закон сохранения энергии является «путеводной звездой» для рассмотрения любых процессов, связанных с выделением или поглощением различных видов энергии и ее переходами (преобразованиями) между различными видами. Основным источником энергии для нашей планеты является солнце. Миллиардами лет энергия, сообщаемая солнцем нашей планете, накапливалась растениями и живыми организмами, а также преобразовывалась в различные взаимосвязанные химические соединения. До нашего времени накопления энергии доисторическими растениями и живыми организмами дошли в виде нефти, газа, угля и др. углеводородов, имеющих колоссальные запасы накопленной энергии. К сожалению, данные источники энергии являются истощимыми и имеют разную степень доступности и эффективность использования. Главным недостатком данных источников энергии стоит считать их истощаемость и ограниченность запасов. Условно неистощимой

можно считать энергию, получаемую нашей планетой от солнца ежедневно в виде солнечных лучей. Энергия солнца, попадая в земную атмосферу, успешно достигает ее поверхности и преобразуется в другие виды энергии. Тепло, создаваемое солнечным светом, греет океанические массы воды и воздуха, которые испаряются и поднимаются в верхние воздушные слои. На их место устремляются холодные воздушные массы, тем самым создается перепад атмосферных давлений, следствием чего является образующийся ветер[1]. Ветер является одной из основных форм существования энергии на поверхности нашей планеты, являющимся следствием преобразования солнечной энергии. Движущиеся воздушные массы с высокой влажностью, достигая глубины континентов, выпадают осадками в виде дождя, снега и др., чем питают реки, которые истекают из глубин континентов обратно в мировой океан; также обладают значительными запасами потенциальной энергии водяных масс на возвышенности. Таким образом, основные, наиболее часто встречающиеся и доступные виды энергии – это солнечная, ветряная, гидроэнергия, а также накопленная энергия в углеводородах, которые являются перевоплощенными проявлениями энергии солнца и напрямую демонстрируют закон сохранения энергии. Примерные объемы энергии представлены на рисунке 1.

Вопросы преобразования энергии, переход ее из одной формы в другую, на протяжении долгого времени волнуют человечества. Успех существования человечества, его сохранность как вида напрямую зависит от умения и развитости технологии получения и преобразования поступающей и запасенной в виде углеводородов на планете энергии для своих нужд.

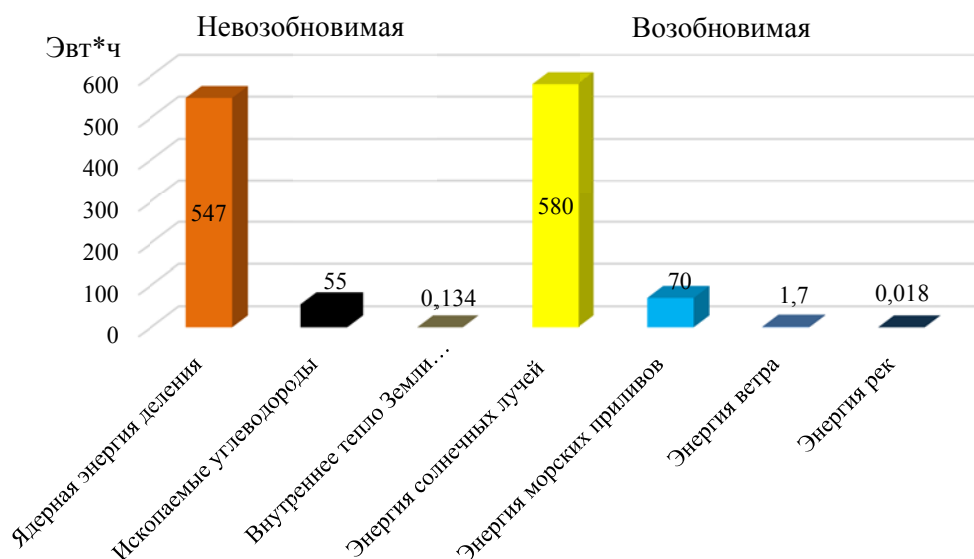


Рисунок 1 – Объемы имеющейся энергии

Вопрос получения дешевой и доступной энергии стоял перед человечеством с незапамятных времен и является актуальным в настоящий момент. На заре своего существования общество использовало в качестве поставщиков дешевой универсальной энергии рабов, которые в парадигме первобытного общества как бы исключались из его членов. В течение своего развития человечество проделало длинный путь по поиску, добыче, преобразованию и передаче энергии. Первым шагом данного пути был переход от эксплуатационного использования невольнического человеческого труда и животных к использованию сил природы для получения энергии (ветер, падающая вода и др.) и преобразования ее в нужную механическую энергию. Дальнейшее развитие человечества, открытие электроэнергии и ее широкое внедрение в народное хозяйство упростило использование и преобразование энергии, но оставило актуальными вопросы ее получения и передачи.

Организация эффективного ведения народного хозяйства на больших территориях нашей страны и в других малонаселенных обширных территориях иностранных государств выявляет дефицит энергоснабжения данных территорий, вызванный отсутствием классических источников электроэнергии на данных территориях и слабой развитостью использования ВИЭ[2]. К сожалению, 70% территории России остаются не охваченными сетью централизованного электроснабжения. Эти территории являются географически изолированными, то есть находятся на значительном удалении и(или) отделены территорией со сложным рельефом (реки, горы, болота, вечная мерзлота) от крупных электрогенерирующих узлов или проложенных линий электропередач. Однако именно на эти территории приходится значительная часть добычи сырьевых ресурсов, которые составляют основу экономики России (рисунок 2).

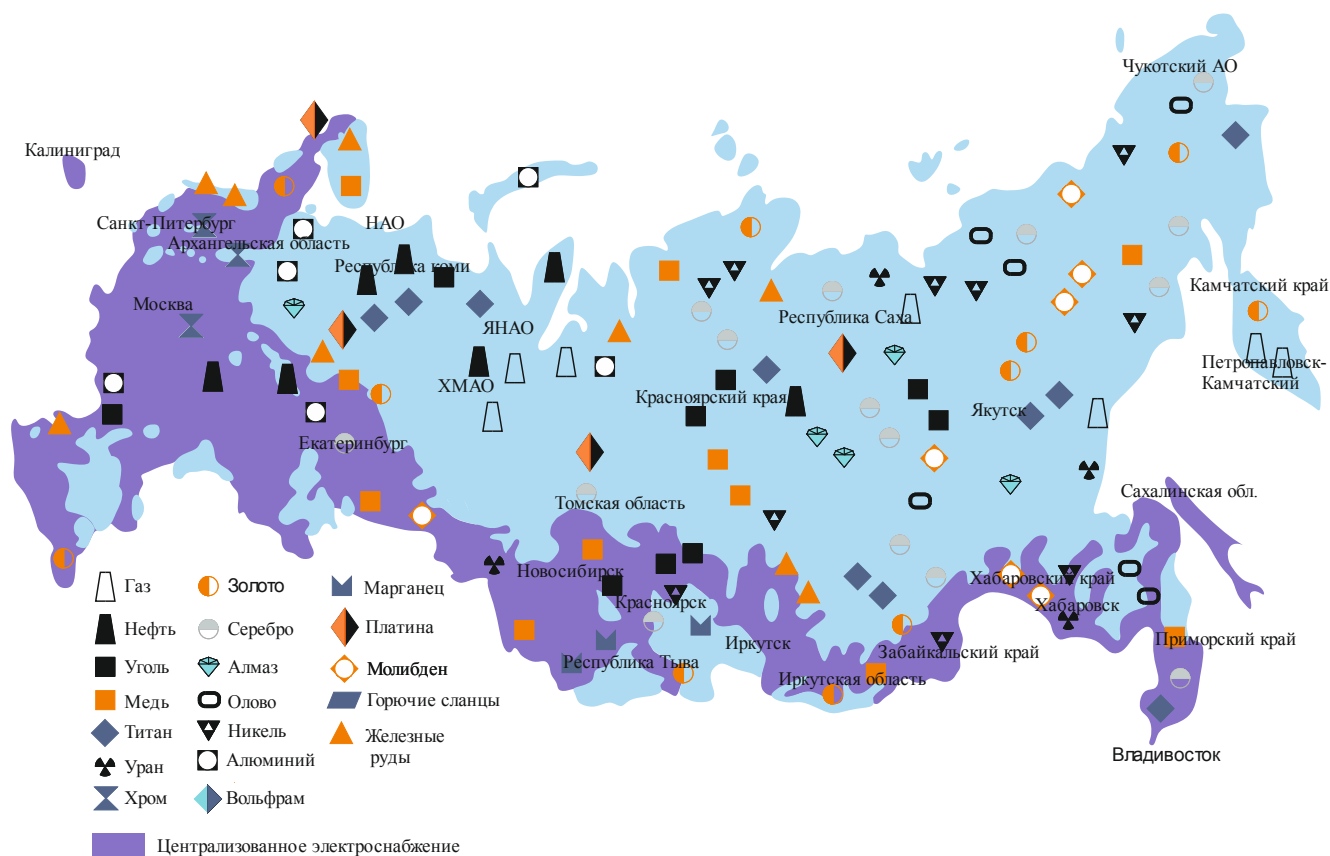


Рисунок 2 – Соотношение территорий, имеющих централизованное электроснабжения и мест добычи полезных ископаемых

На территории зон, не охваченных централизованным электроснабжением, находятся такие важные отрасли как: добыча углеводородных полезных ископаемых: нефть, газ, уголь, а также рудных, не рудных и гидроминеральных полезных ископаемых, сельскохозяйственные территории, практически весь лесопромышленный сектор. Вопросы энергоснабжения и электрификации изолированных регионов и территории, на которых производится добыча углеводородов, решаются путем организации региональных крупных узлов энергогенерации с использованием добываемых в регионе углеводородов в качестве топлива.

Сложнее происходит электрификация крупных областей, имеющих большое количество производств по добыче и переработке природных ископаемых, но у которых отсутствуют собственные углеводородные ископаемые и электрификация от централизованного электроснабжения. Данные крупные промышленные центры снабжаются углеводородами из других областей, что позволяет им организовать собственные крупные узлы автономной генерации тепловой и электрической энергии. Электроэнергия, выработанная в автономных узлах электрогенерации, распространяется по собственным

линиям электропередач, которые, как правило, имеют весьма короткую протяженность. Можно привести классический пример: обогатительный завод, стоящий на месте какого-либо месторождения природных ископаемых, и возведенную рядом тепло-электростанцию, снабжаемую углем по железной дороге, которая обеспечивает тепловой и электроэнергией данный завод и жилой сектор около него.

Такая система электроснабжения уступает по эффективности централизованной системе электроснабжения за счет значительных затрат на транспортировку и поставку энергоресурсов, а также меньшего КПД электрогенерации и невозможности компенсации пиков потребления. Однако данный вид электроснабжения является достаточно эффективным за счет экономии на масштабе, которая возникает при электрогенерации значительных мощностей и объединения значительного числа электропотребителей в единую автономную систему.

Наиболее сложной и трудно решаемой проблемой является ситуация с электроснабжением удаленных географически изолированных областей с небольшими объемами и распыленным по большим площадям электропотреблением, а также отсутствием собственных ископаемых энергоресурсов и неразвитой инфраструктурой. Передача электроэнергии по линиям электропередач для данных областей нецелесообразна, как уже было отмечено в работе [3]. Кратко еще раз перечислим недостатки организации электроснабжения таких областей по средствам строительства линий электропередач (ЛЭП):

- дороговизна строительства, обслуживания ЛЭП и сопутствующего оборудования;
- зависимость возможной протяженности от мощности ЛЭП;
- опасность выхода из строя ЛЭП из-за климатических явлений.

Обеспечение данной группы электропотребителей в данный момент осуществляется только путем снабжения данных областей энергоносителями из других областей и организацией собственных маломощных узлов электро- и теплогенерации. Использование средств возобновляемой электроэнергии (ВИЭ), наличие которых есть в данных областях, развито слабо или полностью отсутствует.

Обеспечение электроснабжением данного вида электропотребителей в первую очередь организуется путем создания малых (локальных) центров электрогенерации и(или) объединения нескольких малых электрогенераторов в местную автономную конгломерацию со своей электросетью и сопутствующим оборудованием. Электросеть может охватывать от нескольких городов до одного хозяйства или даже дома.

Наиболее распространенными автономными источниками электроэнергии являются дизельные электрогенераторы. Они получили свое распространение благодаря:

- большому диапазону вырабатываемой мощности от 2кВт до 2,5МВт;
- малому удельному расходу топлива на единицу вырабатываемой энергии;
- распространенности дизельного топлива;
- высокому ресурсу работы;
- высокой мобильности;
- простоте монтажа и эксплуатации;
- надежности и ремонтнопригодности.

Для повышения эффективности, качества и обеспечения надежного электроснабжения стоит использовать в совокупности с классическими методами электрогенерации альтернативные ВИЭ, доступные в указанных областях, учитывающих ее географическое расположение и наличие производственных отходов, которые могут быть использованы как топливо.

Создавая электрическую систему с различными источниками (способами генерации) мы получаем сеть с гибридным электрогенерирующими мощностями. В гибридных сетях электрогенерирующие мощности являются совокупностью электрогенерации, объединенной различными методами. В настоящий момент в гибридной сети основным является классический метод электрогенерации на основе дизельного, газового или др. генератора на классическом топливе, а дополнительным (вспомогательным) является генератор, работающий на ВИЭ.

К сожалению, на данном этапе развития науки возобновляемая электроэнергетика не может надежно и в полном объеме обеспечить электроэнергией электропотребителей. Исключение могут составить лишь частные случаи автономных электроприборов малой мощности. К данным приборам можно отнести метеодатчики, станции слежения за погодой, опознавательные огни, автономные светофоры на удаленных участках автодороги и др. Только данный узкий круг электропотребителей может быть полностью электрифицирован за счет ВИЭ. В этих случаях, как правило, используют солнечные батареи или ветровые электрогенераторы, соединенные через контроллер с накопителем; накопителем может являться как простейший аккумулятор (щелочной, литиевый), так и более сложный маховичный накопитель или другой накопитель электроэнергии с аккумулирующим устройством. Накопитель, в свою очередь, питает электропотребителя и выполняет две функции. Первая функция – это электрогенерация за счет накопленного заряда еще до установки в критических моментах. Вторая функция – стабилизация и запасание электроэнергии от солнечной батареи (или другого источника ВИЭ) и отдача запасенной электроэнергии в нужный момент в случае отсутствия электрогенерации от солнечной батареи. Такой метод электроснабжения изолированных малых электропотребителей является непревзойденным по своей эффективности и тоже может быть отнесен к гибридной электроэнергетике. Генерация электроэнергии в данном случае осуществляется двумя способами – электрохимическая реакция и преобразование солнечного света. Таким образом, для обеспечения потребителя электроэнергией используются два различных электрогенератора, связанных в одной цепи и дополняющих друг друга для обеспечения надежного функционирования электросистемы.

Более крупные электропотребители не могут быть обеспечены электроэнергией в полном объеме только за счет ВИЭ по причине необходимости больших объемов электроэнергии и качества (бесперебойность и надежность) электроснабжения.

В этом случае электрическая система строится с использованием классического дизельного (газового и т.п.) генератора, наличие которого позволит обеспечить необходимый объем генерируемой электроэнергии на постоянной основе.

В некоторых случаях дизельный генератор может быть заменен мини-гидроэлектростанцией (мГЭС), при условии, что поблизости электрифицируемого объекта есть необходимые водные ресурсы.

Так, в определенных географических областях или видах промышленности, имеются в шаговой доступности значительные объемы водных ресурсов сосредоточенных в реках, озерах или ручьях. В этом случае становится выгодно использовать мГЭС при условии достаточного объема энергии, аккумулируемого водным потоком. В некоторых случаях данный показатель может быть увеличен за счет дополнительного увеличения перепада высот (строительства плотины, отведения деривационного трубопровода, строительством отводного канала) или другими инженерными решениями, которые приведут к повышению объемов или скорости протекающей через турбогенератор воды. Данный метод электроснабжения может быть весьма эффективно использован в лесопромышленном комплексе, склады которого часто сосредотачиваются на берегах рек для использования их при транспорте леса лесосплавом. В некоторых случаях энергия воды не преобразуется в электрическую, а используется напрямую через системы шарнирных передаточных устройств: к водной турбине подключаются циркулярные пилы для раскройки древесины.

Наличие водных ресурсов в непосредственной близости также присутствует в рыболовном и охотничьем промыслах, а также в сельском хозяйстве для орошения. Все перечисленные производства невозможны без наличия рядом проточных вод, а значит могут быть электрифицированы за счет использования энергии текущей воды и ее преобразования в электроэнергию. Также необходимо отметить, что реки, как правило, текут в низинах рельефа и сопровождаются ветрами что плодотворно влияет на сопутствующие снабжение данных производств ветряками.

К сожалению, широкого распространения на территории нашей страны мГЭС и ветрогенераторы не получили.

Также ВИЭ регулярного электроснабжения могут быть организованы на основе использования отходов различных производств, невостребованных попутных ресурсов

производства или паразитных мощностей. Так, при нефтедобыче из шахты выходят второстепенные природные газы, которые раньше просто сжигались. В настоящий момент они используются для получения тепловой энергии, используемой в производстве, или очищаются и сжижаются для использования в химической промышленности.

В лесопромышленном комплексе при лесозаготовках или деревообработке образуются значительные объемы биомассы (опилки, ветки и мелкие сучья, корневая часть дерева), а также вырубленные кустарники и мелкий подрост при рубке деловой древесины. К сожалению, как правило, на большинстве рубок данные ресурсы не получают практического применения и просто сжигаются в кострах как мусор. Хотя в настоящий момент активно развиваются производства по производству пеллет. Пеллеты – это брикеты из спрессованных опилок, щепы или других горючих производных от древесины. В европейских странах для изготовления пеллет также используются и сопутствующие продукты леса: шишки, желуди, кора и хвоя. Данные брикеты используются для отопления, а также для обеспечения работы газогенераторов. Достоинством пеллет является высокая экологичность, возможность автоматизации процесса топливоподачи, что выгодно отличает их от деревянных чурок. Также для аналогичных целей часто используют деревянную щепу, особенно эффективной является березовая щепа благодаря высокой теплотворности горения, возможности автоматизированной подачи в топку, низкой зольности и невысокой цене, благодаря широкому распространению березы и ее быстрому росту.

Заключение

Таким образом, для повышения эффективности электроснабжения удаленных изолированных потребителей электроэнергии лучшим решением является применение гибридных способов электрогенерации, которые сочетают в себе преимущества классических и работающих на ВИЭ способов электрогенерации.

В случае уже существующего электрообеспечения объекта могут быть использованы ВИЭ для создания параллельной сети электроснабжения. Наиболее же эффективными с точки зрения авторов являются создание новой общей сети или подключение дополнительных генерирующих мощностей к уже имеющейся сети электроснабжения ВИЭ через различные инвертеры, являющиеся ведомыми преобразователями основной электросети.

Получаемый эффект от объединения классических способов электрогенерации и способов, основанных на использовании ВИЭ, значительно больше, чем в случае использования их раздельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика / В.В. Елистратов. –Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016.–424 с.
2. Вайнзихер Б.Ф. Энергетика России 2030: целевое издание / Б.Ф. Вайнзихер. –М: Альпина Бизнес Букс, 2008. – С.45.
3. Селиванов К.В. Анализ способов малого распределённого электроснабжения / К.В. Селиванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1(55) часть 4. – С. 107–110.
4. Быстрицкий, Г.Ф. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии)/ Г.Ф. Быстрицкий, Г.Г. Гасангаджиев, В.С. Кожиченков. –М.:КНОРУС, 2014.–408 с.
5. Суринов, А.Е. Российский статистический ежегодник / Е. А. Сурин и др. – М.: Стат.сб. Росстат, 2015г. –728 с.
6. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива. Показатели по территориям: справочное пособие. – М.: ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
7. Elistratov V.V., Kudryasheva I.G. Principles of an integrated approach to determining the efficiency of stand-alone wind-diesel power systems // Power Technology and Engineering. – 2016. – PP.1–4.
8. Люминарская Е.С. Экономические и другие аспекты эффективности использования малой распределённой энергетики в России / Е.С. Люминарская, К.В. Селиванов // Перспективы устойчивого развития лесопромышленного комплекса РФ: Сборник материалов общероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 266–271.
9. Селиванов К.В. Проблемы электроснабжения в лесопромышленном комплексе / К.В. Селиванов // Научно-техническая конференция МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи. – 2017. – С 227–229.

Васильев Игорь Александрович
МГТУ им. Н.Э.Баумана,
г.Москва.
Кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электротехника и
промышленная электроника».
тел. 8-903-529-25-88
e-mail: ivasiliev@rslab.ru

Люминарская Екатерина Станиславовна
МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электротехника и
промышленная электроника».
тел. 8-905-508-92-14
e-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

Селиванов Кирилл Владимирович
МГТУ им. Н.Э.Баумана,
г.Москва.
Кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электротехника и
промышленная электроника».
тел. 8-915-342-08-03
e-mail: Selivanov_kv@mail.ru

I.A. VASILEV, E.S. LYUMINARSKAJA, K.V. SELIVANOV

HYBRID ENERGY AS A METHOD OF ELECTRIFICATION OF GEOGRAPHICALLY ISOLATED CONSUMERS

Abstract. *Raising the standard of living of the population requires an increase in electricity consumption. The problem of electrification of remote, geographically isolated sparsely populated territories of Russia, remains relevant at the present time. The fact that a significant part of the production complex, including the RF mining complex, is located outside the territories of the centralized power supply adds to this problem. To provide electric consumers of these areas, a complex non-trivial task is required to develop new methods of electricity generation and power supply. The exhaustion of classical energy resources, problems with ecology and climate force mankind to seek new sources of electricity and gradually switch to the use of renewable energy sources. Current technical development does not provide the opportunity to fully provide remote electric consumers with one way of generating electricity for renewable energy sources, but by hybridizing several generating capacities operating on various renewable energy sources it becomes possible to significantly reduce the use of hydrocarbon energy carriers or completely abandon them when electrifying remote power consumers.*

Keywords: *Renewable energy source, hybrid power, generator, solar battery.*

BIBLIOGRAPHY

1. Elistratov V.V. Vozobnovlyamaya ehnergetika / V.V. Elistratov. – Spb.: Izd-vo Politekhn. Un-ta, 2016. – 424 s.
2. Vajnzher B.F. Ehnergetika Rossii 2030: celevoe izdanie / B.F. Vajnzher. – M.: Alpina Biznes Buks, 2008. – S.45.
3. Selivanov K.V. Analiz sposobov malogo raspredelyonnogo ehlektrosnabzheniya / K.V. Selivanov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2017. – № 1(55) chast 4. – S. 107–110.
4. Bystrickij, G.F. Obshchaya ehnergetika (Proizvodstvo teplovoj i ehlektricheskoy ehnergii) / G.F. Bystrickij, G.G. Gasangadzhiev, V.S. Kozhichenkov. – M.:KNORUS, 2014. – 408 s.
5. Surinov, A.E. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik / E. A. Surin i dr. – M.: Stat.sb. Rosstat, 2015g. – 728 s.
6. Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых istochnikov ehnergii Rossii i mestnym vidam topliva. Pokazateli po territoriyam: spravochnoe posobie. – M.: IAC Ehnergiya, 2007. – 272 s.
7. Elistratov V.V., Kudryasheva I.G. Principles of an integrated approach to determining the efficiency of stand-alone wind-diesel power systems // Power Technology and Engineering. – 2016. – PP. 1– 4.
8. Lyuminarskaya E.S. Ehkonomicheskie i drugie aspekty ehffektivnosti ispolzovaniya maloj raspredelyonnoj ehnergetiki v Rossii / E.S. Lyuminarskaya, K.V. Selivanov // Perspektivy ustojchivogo razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa RF: Sbornik materialov obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2018. – S. 266–271.
9. Selivanov K.V. Problemy ehlektrosnabzheniya v lesopromyshlennom komplekse / K.V. Selivanov // Nauchno-tehnicheskaya konferenciya MF MGTU im. N.Eh. Bauman, Mytishchi. – 2017. – S 227–229.

Vasiliev Igor Aleksandrovich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow.
Candidate of technical Sciences,
docent of the
Department "Electrical engineering
and industrial electronics".
Ph. 8-903-529-25-88
e-mail: ivasiliev@rslab.ru

Lyuminarskaja Ekaterina Stanislavovna
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow.
Candidate of technical Sciences, docent of
the Department "Electrical engineering and
industrial electronics".
Ph. 8-905-508-92-14
e-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

Selivanov Kirill Vladimirovich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow.
Candidate of technical Sciences,
docent of the Department
"Electrical engineering and
industrial electronics".
Ph. 8-915-342-08-03
e-mail: Selivanov_kv@mail.ru

И.А. ШАРИФУЛЛИН, Е.В. САФРОНОВ, А.Л. НОСКО, В.А. ПОТАПОВ

СТЕНД ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОРМОЗНЫХ РОЛИКОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Аннотация. Разработан стенд, позволяющий моделировать реальные режимы эксплуатации и проводить ресурсные испытания тормозных роликов различных типов, применяемых в паллетных гравитационных конвейерах и стеллажах отечественных и зарубежных производителей. Представлена принципиальная электрическая схема стенда, оснащенная необходимыми элементами безопасности для предотвращения и/или минимизации аварийных ситуаций. Описана измерительная система, обеспечивающая оперативный сбор, обработку информации, поступающей со стенда и объекта исследования, и снижающая трудоемкость анализа результатов эксперимента. Стенд работает в автоматическом режиме, предназначен для испытаний роликов различных конструктивных исполнений диаметром от 50 мм до 135 мм и позволяет имитировать торможение паллет с грузом массой от 50 до 1500 кг.

Ключевые слова: стенд, тормозной ролик, гравитационный роликовый конвейер, паллета, автоматический режим.

Введение

Основным элементом гравитационных роликовых конвейеров для паллет (далее – конвейеров), определяющих их безопасную эксплуатацию, являются тормозные ролики. Применение тормозных роликов вызвано необходимостью ограничения скорости паллеты с грузом (далее – паллеты) в конвейере [1, 2].

Следует отметить, что при поставках гравитационного стеллажного оборудования, изготовители не сопровождают используемые в конвейерах тормозные ролики технической информацией, позволяющей оценить эффективность применения и срок эксплуатации тормозных роликов в зависимости от режима работы гравитационного конвейера [3]. В связи с этим актуальной задачей является оценка ресурса тормозных роликов, применяемых в гравитационных роликовых конвейерах. Это требует разработки специального стендового испытательного оборудования.

Проведенный патентный обзор и анализ отечественных стендов для исследования конвейерных роликов показал, что имеются стенды, предназначенные для испытаний сопротивления вращению роликов [4, 5, 6], устойчивости роликов к абразивному износу [7, 8], влияния динамических нагрузок на ролик [9, 10, 11, 12], проверки роликов на прочность [13], оценки тормозных характеристик роликов [3, 14], которые однако не позволяют проводить ресурсные испытания тормозных роликов, применяемых в гравитационных конвейерах для паллет.

На кафедре «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан испытательный стенд, позволяющий проводить исследования срока службы тормозных роликов различных конструктивных исполнений [15, 16], применяемых в паллетных гравитационных конвейерах и стеллажах отечественных и зарубежных производителей.

Стенд для ресурсных испытаний тормозных роликов гравитационных конвейеров и стеллажей для паллет

Стенд для ресурсных испытаний тормозных роликов (рисунок 1) состоит из трех основных частей – механической, электрической и измерительной.

Механическая часть

Механическая часть стенда (рисунок 1) состоит из станины 8 с присоединенным к ней столом 7. Станина 8 включает в себя переднюю 9 и заднюю 10 опоры, между которыми размещается тормозной ролик 1. Передняя опора 9 выполнена в виде подшипникового узла, через который проходит вал 15 с фланцем, жестко соединенный с фланцем тормозного ролика 1. На другом конце вала 15 установлена электромагнитная муфта 11 сухого трения [17] с поводком, предназначенная для разгрузки тормозного ролика 1 от дополнительных инерционных масс, препятствующих его свободному вращению. На столе 7 размещен механизм подъема, включающий асинхронный электродвигатель 13 и червячный редуктор 12, который соединяется с валом 15 посредством упругой кулачковой муфты 14.

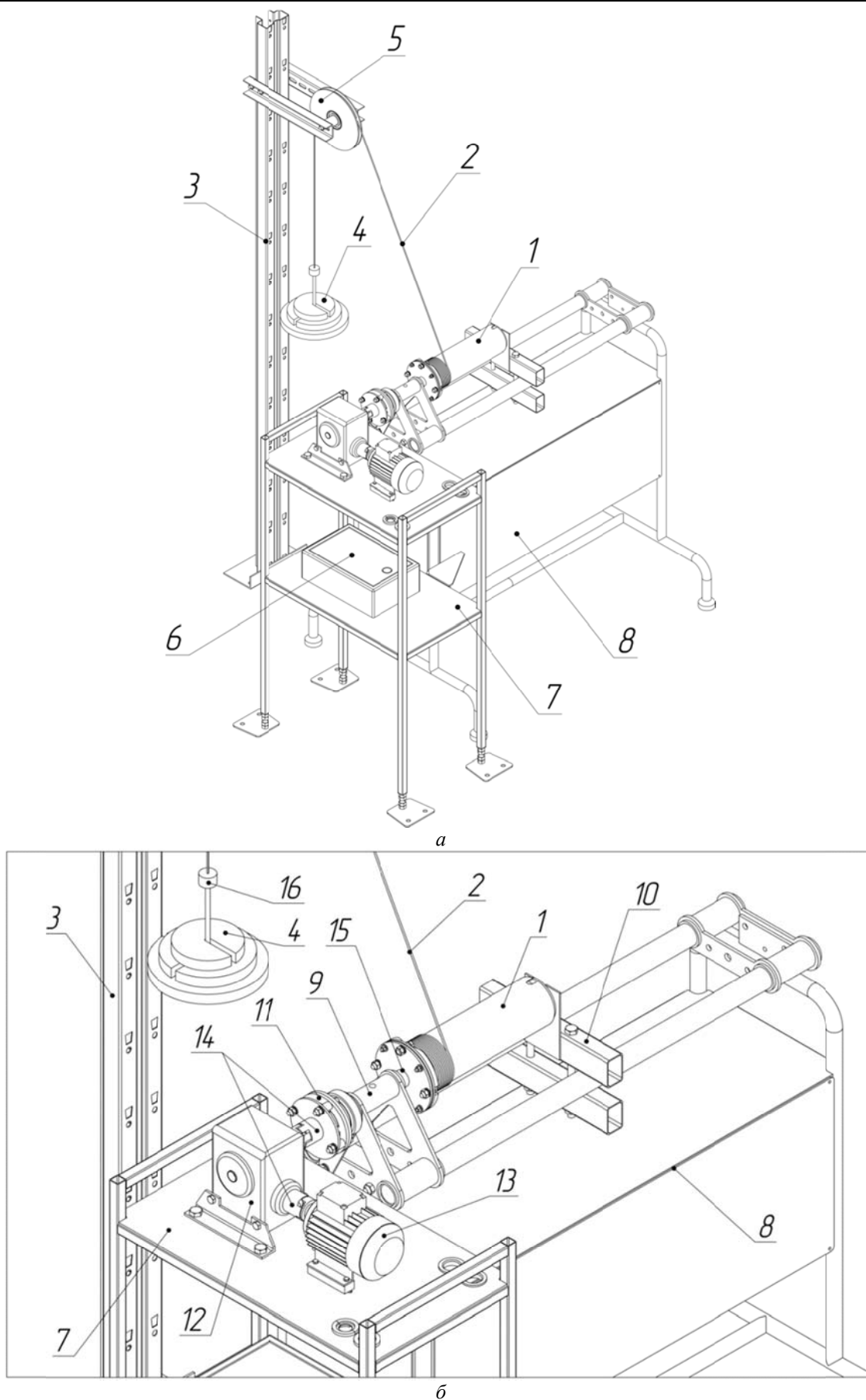


Рисунок 1 – Испытательный стенд: а – механическая часть, б – механизм подъема

Полиспаcтная система, которая предназначена для нагружения тормозного ролика крутящим моментом, имитирующим движение паллеты по тормозному ролику, состоит из

ролика 1, на который наматывается канат 2, и направляющего блока 5, размещенного на кронштейнах стойки 3. Один конец каната 2 жестко закрепляется на тормозном ролике 1, а другой конец каната, проходящий через направляющий блок 5, соединяется с грузовой подвеской 16, на которой размещаются контрольные грузы 4.

Удержание контрольных грузов 4 на весу осуществляется посредством самоторможения вала червячного колеса редуктора 12 при её соединении с валом электромагнитной муфты 11. При этом редуктор стенда выбран из условия удержания на весу контрольного груза массой 30 кг, имитирующего движение паллеты массой 1500 кг по роликовому полотну гравитационного конвейера с углом наклона от 2° до 6° .

При проведении испытаний массу контрольного груза 4 выбирают в соответствии с массой паллеты, углом наклона гравитационного конвейерного полотна, шагом расстановки и диаметром тормозного и несущих роликов.

Электрическая часть

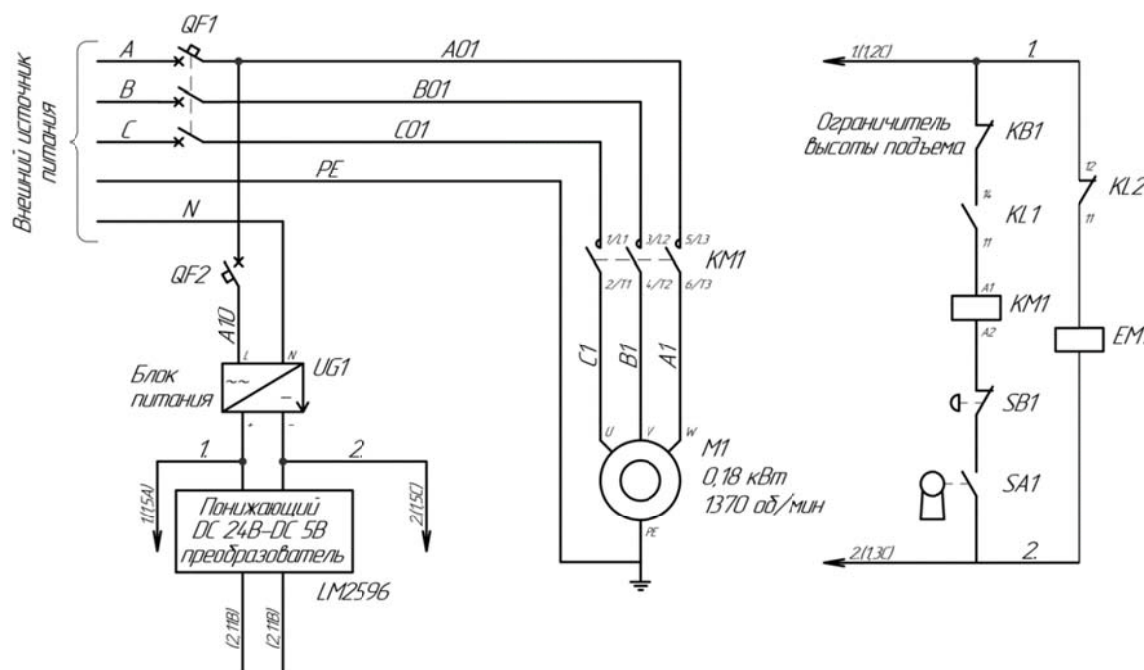


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема

Электрическая часть (рисунок 2) включает в себя автомат защиты QF1 для электродвигателя M1 с тепловой и электромагнитной защитой от короткого замыкания, перегрузки и перегрева; автоматический выключатель QF2 для защиты блока питания UG1, преобразующего переменное напряжение 220В в постоянное напряжение 24В, от токов короткого замыкания и перегрузки. К контактам электродвигателя M1 подключается линейный электромагнитный пускатель KM1, при подаче напряжения на катушку KM1 которого осуществляется включение электродвигателя M1. Электромагнитная муфта EM1 питается от блока питания UG1, выдающего постоянное напряжение 24В, и замыкается с помощью нормально-замкнутого ключа KL2 электромеханического реле KL2 (см. рисунок 3). Система оснащена кнопкой «СТОП» с фиксацией SB1, предназначенной для снятия напряжения с линейного пускателя KM1 при возникновении (или вероятности возникновения) аварийной ситуации. Кроме того, в схеме предусмотрен ограничитель высоты подъема KB1, выполненный в виде концевого выключателя, который в случае сбоя программы отключает электродвигатель M1 механизма подъема при наезде груза 4 на пружинный стержень концевого выключателя. Также в схему установлен понижающий преобразователь LM2596 (DC 24В – DC 5В), питающий микроконтроллер платформы Arduino (рисунок 3).

Функционирование испытательного стенда является автоматическим, оператор осуществляет ввод программы и настройку системы стенда.

Измерительная система

Измерительная система (рисунок 3) построена на аппаратной платформе ArduinoUNORev3 [18] и обеспечивает оперативный сбор, обработку и отображение информации (на экране ПК), поступающей со стенда и объекта испытаний (тормозного ролика), что значительно упрощает и снижает трудоемкость обработки результатов испытаний.

Измерительная система помимо платы ArduinoUNORev3 состоит из двух электромеханических реле KL1 и KL2, силовые контакты которых размещены в электрической части стенда (рисунок 2), датчика Холла HOLL1 и дальномера HCSR04.

Диоды KL1 и KL2, подключенные параллельно катушкам реле KL1 и KL2, выполняют защитную функцию, а именно, гашение ЭДС самоиндукции при отключении реле и предотвращение перенапряжения на ключевом элементе, управляющем обмоткой реле.

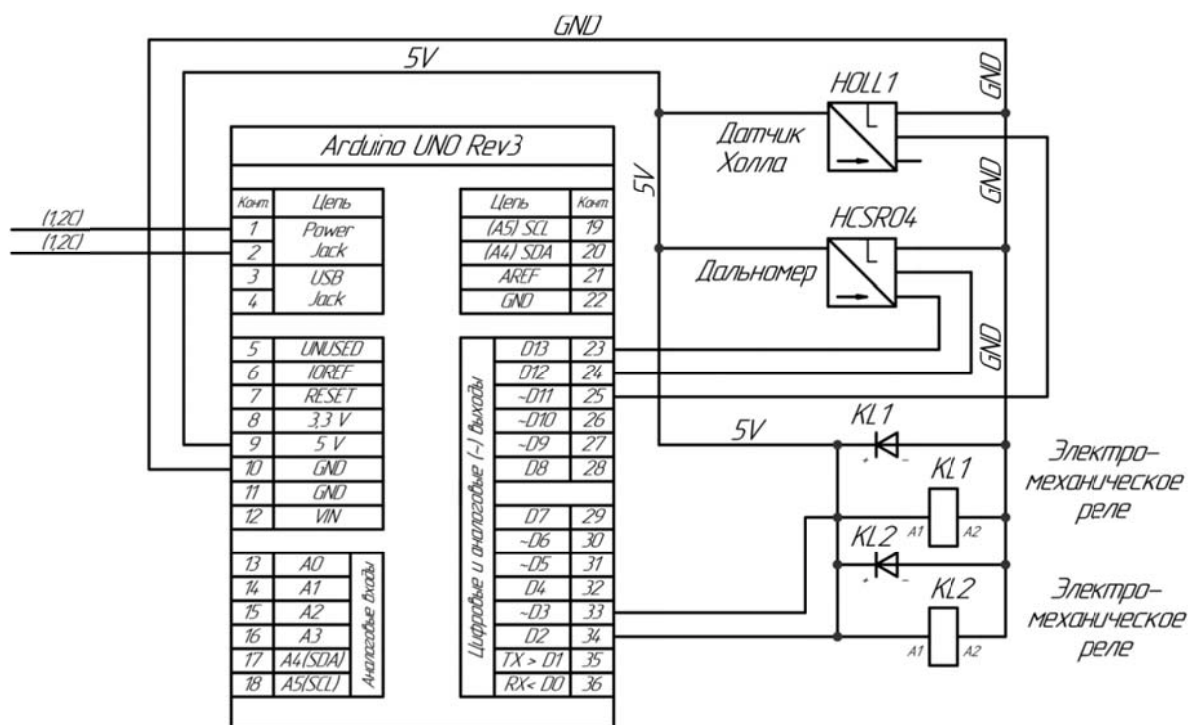


Рисунок 3 – Измерительная система стенда

Дальномер HCSR04 используется в качестве датчика положения груза 4, измеряя расстояние, пройденное контрольным грузом при торможении. Датчик Холла HOLL1 осуществляет измерение скорости вращения обечайки тормозного ролика 1, что в свою очередь позволяет определить среднюю скорость груза 4 в каждом цикле торможения [19]. В качестве одного цикла предусмотрено торможение груза при его опускании на расстояние равное длине паллеты.

На основании полученных результатов измерений проводится расчет (в программе MicrosoftExcel) и строится график скорости установившегося движения паллеты в процессе ее торможения в гравитационном канале конвейера или стеллажа в зависимости от ее массы, по которому определяется степень износа тормозного ролика [20,21].

Описание работы стенда и проведения испытаний

После подачи напряжения от внешнего источника питания (~380В, 50Гц) осуществляется включение автоматов защиты QF1 и QF2. Происходит включение блока питания UG1, запуск загрузки программы ArduinoUNORev3 и замыкание электромагнитной муфты EM1. Считывается сигнал с дальномера. Система управления (далее – СУ) получает информацию о местонахождении подвески 16 с контрольным грузом 4. Далее оператор замыкает цепь питания катушки линейного пускателя KM1 путем поворота ключа-марка SA1. В зависимости от местоположения груза и от сигнала дальномера на платформу Arduino, например, груз занимает крайнее верхнее (исходное) положение, СУ подает сигнал

на соответствующее реле, т.е. KL2, ключ которого размыкаясь, приводит к обесточиванию электромагнитной муфты EM1 и разъединению вала 15 с выходным валом редуктора 12.

Контрольный груз 4 начинает опускаться под действием силы тяжести. В процессе движения груза происходит измерение расстояния, пройденного контрольным грузом в процессе его торможения, определение и запись его средней скорости при торможении датчиком Холла HOLL1. При достижении грузом 4 крайнего нижнего (конечного) положения (20 см от пола) датномер HCSR04 подает сигнал на платформу Arduino, которая в свою очередь замыкает ключ KL2 путем подачи управляющего сигнала на реле KL2. Осуществляется замыкание электромагнитной муфты EM1 и восстановление соединения вала 15 с редуктором 12. Вращения тормозного ролика 1 прекращается, груз 4 останавливается.

Далее, согласно программе, СУ подает сигнал на электромеханическое реле KL1 и замыкает его ключ, что приводит к подаче питания на катушку линейного пускателя KM1. Включается электродвигатель M1 и контрольный груз 4 начинает подниматься, а канат 2 наматывается на обечайку тормозного ролика 1. В процессе движения датномер HCSR04 измеряет расстояние, пройденное контрольным грузом 4, и, при достижении им исходного положения, датномер подает сигнал в СУ, которая отключает механизм подъема размыканием ключа KL1 и включает электромагнитную муфту EM1 замыканием ключа KL2. Груз 4 останавливается и удерживается в крайнем верхнем положении.

Далее цикл повторяется и проводится следующее торможение в автоматическом режиме.

Заключение

Разработана оригинальная конструкция автоматического стенда, позволяющая:

- имитировать реальные режимы эксплуатации и проводить ресурсные испытания тормозных роликов различных конструктивных исполнений, применяемых в паллетных гравитационных конвейерах и стеллажах отечественных и зарубежных производителей;
- испытывать ролики диаметром от 50 мм до 135 мм и имитировать торможение паллет с грузом массой от 50 до 1500 кг;
- снизить трудоемкость проведения испытаний путем их выполнения в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. Москва, Машиностроение, 1973, 216 с.
2. ПОТ Р М-029-2003. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации промышленного транспорта (конвейерный, трубопроводный и другие транспортные средства непрерывного действия). Москва, Изд-во НЦ ЭНАС, 2003, 83 с.
3. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Устройство для имитации нагрузки в стенде для испытания тормозных роликов центробежного типа гравитационных конвейеров и стеллажей. Пат. № 171513 Российская Федерация, 2017, бюл. № 16, 7 с.
4. Вычигин А.Н., Старик В.Н., Белостоцкий Б.Х., Загорский Г.А., Заволодько В.П. (СССР). Стенд для определения сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров. А.с. 1791289 СССР, опубл. 30.01.93, бюл. № 4, 6 с.
5. Новиков Е.Е., Монастырский В.Ф., Лисица Н.И., Плахотник В.И., Бесчастный В.И., Богуславская З.П. (СССР). Устройство для определения сопротивления вращению роликов ленточного конвейера. А.с. 1066912 СССР, опубл. 15.01.84, бюл. № 2, 4 с.
6. Купчинов Б.И., Немогай Н.В., Гайдук Б.С., Павлов В.И. (СССР). Стенд для испытания роликов конвейера. А.с. 659476 СССР, опубл. 30.04.79, бюл. № 16, 4 с.
7. Барсуков В.Г., Индучный В.И., Горленко С.М., Извеков В.А. (СССР). Стенд для испытания роликов конвейера. А.с. 1021648 СССР, опубл. 07.06.83, бюл. № 21, 4 с.
8. Купчинов Б.И., Немогай Н.В. (СССР). Стенд для испытания роликов ленточного конвейера. А.с. 636148 СССР, опубл. 05.12.78, бюл. № 45, 3 с.
9. Демулин А.С., Модин Н.А., Янговский Л.И. (СССР). Стенд для испытания роликов ленточного конвейера. А.с. 939355 СССР, опубл. 30.06.82, бюл. № 24, 5 с.
10. Рябинин Г.И., Янговский Л.И. (СССР). Стенд для испытания ролика конвейера. А.с. 952700 СССР, опубл. 23.08.82, бюл. № 31, 4 с.
11. Новиков Е.Е., Монастырский В.Ф., Дырда В.И., Лисица Н.И., Ненадкевич Ю.П., Рыжко П.С. (СССР). Стенд для испытания роликов ленточного конвейера. А.с. 1097529 СССР, опубл. 15.06.84, бюл. № 22, 3 с.
12. Демулин А.С., Модин Н.А., Янговский Л.И. (СССР). Стенд для испытания роликов ленточного конвейера. А.с. 977318 СССР, опубл. 30.11.82, бюл. № 44, 4 с.

13. Колесниченко К.А., Омельченко Н.И., Голуб В.М., Плиско Л.Н. (СССР). Устройство для испытания роликов на прочность. А.с. 615385 СССР, опубл. 15.07.78, бюл. № 26, 2 с.
14. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Разработка испытательного оборудования для исследования работоспособности тормозных роликов гравитационных конвейеров. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2017, № 4, с. 151–159.
15. Сафронов Е.В. Анализ конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет. Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация. Материалы I Всероссийской заочной научно-практической конференции. Чита, 2016, с. 53–62.
16. Шарифуллин И.А., Сафронов Е.В., Носко А.Л. Обзор и анализ конструкций магнитных тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет. Научный диалог: Вопросы точных и технических наук. Сборник научных трудов по материалам XI международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, Изд-во Общественная наука, 2017, с. 56–62.
17. Электромагнитная муфта сухого трения. URL: http://emufta.ru/catalog/group_595/ (дата обращения: 06.04.2018).
18. Платформа ArduinoUNORev3. URL: <http://iarduino.ru/shop/arduino/arduino-uno-r3.html> (дата обращения: 06.04.2018).
19. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Методика определения максимально допустимой скорости движения поддона на гравитационном роликовом конвейере. Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение, 2017, № 8, с. 32–40.
20. Носко А.Л. Оценка ресурса фрикционной накладки тормоза ГПМ. Трибология – машиностроению. Труды Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. Москва, 2014, с. 61.
21. Носко А.Л. Практические рекомендации по оценке нагруженности узлов трения (применительно к тормозам ПТМ). Известия ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование. Тула, Изд-во ТулГУ, 2006, № 7, с. 146–160.

Шарифуллин Ильдар Азатович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Студент кафедры «Подъемно-транспортные системы»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел. (499) 263–63–91

E-mail: formyjob94@mail.ru

Сафронов Евгений Викторович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел. (499) 263–63–91

E-mail: gen-s@mail.ru

Носко Андрей Леонидович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Подъемно-транспортные системы»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел. (499) 263–63–91

E-mail: dr.nosko@mail.ru

Потапов Валентин Алексеевич

ЗАО ИТЦ «КРОС», г. Ивантеевка

Генеральный директор
141281, Московская область, г. Ивантеевка,
Санаторный проезд, д.1, литера Н, оф. 415

Тел. (495) 645–34–40

E-mail: potapov@itc-kros.ru

I.A. SHARIFULLIN, E.V. SAFRONOV, A.L. NOSKO, V.A. POTAPOV

DEVICE FOR RESOURCE TESTING OF BRAKE ROLLERS OF GRAVITY CONVEYORS

Abstract. At the department "Lifting and transport systems" of the Bauman Moscow State Technical University developed a device that allows to simulate real operating modes and conduct life tests of brake rollers of various types used in pallet gravity conveyors and racks of domestic and foreign manufacturers. A basic electrical diagram of the device is presented, equipped with the necessary safety elements to prevent and/or minimize emergencies. A measuring system is described that ensures the operative collection, processing of information coming from the device and the object of research, and reduces the laboriousness of analyzing the results of the experiment. The device operates in an automatic mode, designed for testing rollers of various design versions from 50 mm to 135 mm in diameter and allows simulating the braking of pallets with a weight of 50 to 1500 kg.

Keywords: device, brake roller, gravity roller conveyor, pallet, automatic mode.

BIBLIOGRAPHY

1. Ivanovskiy K.Ye., Rakovshchik A.N., Tsoglin A.N. Rolikovyye i diskovyye konveyery i ustroystva. Moskva, Mashinostroyeniye, 1973, 216 s.
2. POT R M–029–2003. Mezhotraslevyye pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii promyshlennogo transporta (konveyernyy, truboprovodnyy i drugiye transportnyye sredstva nepreryvnogo deystviya). Moskva, Izd-vo NTS ENAS, 2003, 83 s.

3. Nosko A.L., Safronov Ye.V. *Ustroystvo dlya imitatsii nagruzki v stende dlya ispytaniya tormoznykh rolikov tsentrobezhnogo tipa gravitatsionnykh konveyerov i stellazhey*. Pat. № 171513 Rossiyskaya Federatsiya, 2017, byul. № 16, 7 s.
4. Vychigin A.N., Starik V.N., Belostotskiy B.K.H., Zagorskiy G.A., Zavolodko V.P. (SSSR). *Stend dlya opredeleniya soprotivleniya vrashcheniyu rolikov lentochnykh konveyerov*. A.s. 1791289 SSSR, opubl.30.01.93, byul. № 4, 6 s.
5. Novikov Ye.Ye., Monastyrskiy V.F., Lisitsa N.I., Plakhotnik V.I., Beschastnyy V.I., Boguslavskaya Z.P. (SSSR). *Ustroystvo dlya opredeleniya soprotivleniya vrashcheniyu rolikov lentochnogo konveyera*. A.s. 1066912 SSSR, opubl. 15.01.84, byul. № 2, 4 s.
6. Kupchinov B.I., Nemogay N.V., Gayduk B.S., Pavlov V.I. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov konveyera*. A.s. 659476 SSSR, opubl. 30.04.79, byul. № 16, 4 s.
7. Barsukov V.G., Induchnyy V.I., Gorlenko S.M., Izvekov V.A. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov konveyera*. A.s. 1021648 SSSR, opubl. 07.06.83, byul. № 21, 4 s.
8. Kupchinov B.I., Nemogay N.V. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov lentochnogo konveyera*. A.s. 636148 SSSR, opubl. 05.12.78, byul. № 45, 3 s.
9. Demurin A.S., Modin N.A., Yantovskiy L.I. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov lentochnogo konveyera*. A.s. 939355 SSSR, opubl. 30.06.82, byul. № 24, 5 s.
10. Ryabinin G.I., Yantovskiy L.I. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolika konveyera*. A.s. 952700 SSSR, opubl. 23.08.82, byul. № 31, 4 s.
11. Novikov Ye.Ye., Monastyrskiy V.F., Dyrda V.I., Lisitsa N.I., Nenadkevich YU.P., Ryzhko P.S. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov lentochnogo konveyera*. A.s. 1097529 SSSR, opubl. 15.06.84, byul. № 22, 3 s.
12. Demurin A.S., Modin N.A., Yantovskiy L.I. (SSSR). *Stend dlya ispytaniya rolikov lentochnogo konveyera*. A.s. 977318 SSSR, opubl. 30.11.82, byul. № 44, 4 s.
13. Kolesnichenko K.A., Omelchenko N.I., Golub V.M., Plisko L.N. (SSSR). *Ustroystvo dlya ispytaniya rolikov na prochnost*. A.s. 615385 SSSR, opubl. 15.07.78, byul. № 26, 2 s.
14. Safronov Ye.V., Nosko A.L. *Razrabotka ispytatelnogo oborudovaniya dlya issledovaniya rabotosposobnosti tormoznykh rolikov gravitatsionnykh konveyerov*. *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2017, № 4, s. 151–159.
15. Safronov Ye.V. *Analiz konstruktivnykh tormoznykh rolikov gravitatsionnykh konveyerov dlya pallet*. *Nazemnyye transportno–tekhnologicheskiye sredstva: proyektirovaniye, proizvodstvo, ekspluatatsiya*. *Materialy I Vserossiyskoy zaochnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii*. Chita, 2016, s. 53–62.
16. Sharifullin I.A., Safronov Ye.V., Nosko A.L. *Obzor i analiz konstruktivnykh magnitnykh tormoznykh rolikov gravitatsionnykh konveyerov dlya pallet*. *Nauchnyy dialog: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk*. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam XI mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii*. Sankt–Peterburg, Izd–vo Obshchestvennaya nauka, 2017, s. 56–62.
17. *Elektromagnitnaya mufta sukhogo treniya*. URL: http://emufta.ru/catalog/group_595/ (data obrashcheniya: 06.04.2018).
18. *Platforma ArduinoUNORev3*. URL: <http://iarduino.ru/shop/arduino/arduino-uno-r3.html> (data obrashcheniya: 06.04.2018).
19. Nosko A.L., Safronov Ye.V. *Metodika opredeleniya maksimalno dopustimoy skorosti dvizheniya poddona na gravitatsionnom rolikovom konveyere*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Mashinostroyeniye*, 2017, № 8, s. 32–40.
20. Nosko A.L. *Otsenka resursa friksionnoy nakladki tormoza GPM*. *Tribologiya – mashinostroyeniye*. *Trudy Vserossiyskoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem inostrannykh spetsialistov*. Moskva, 2014, s. 61.
21. Nosko A.L. *Prakticheskiye rekomendatsii po otsenke nagruzhennosti uzlov treniya (primeritelno k tormozam PTM)*. *Izvestiya TulGU. Ser. Pod"yemno–transportnyye mashiny i oborudovaniye*. Tula, Izd–vo TulGU, 2006, № 7, s.146–160.

Sharifullin Ildar Azatovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Student of the Department «Lifting and transportsystems»
105005, Moscow, 2–ya Baumanskayaul., 5, str. 1
Ph.: (499) 263–63–91
E–mail: formyjob94@mail.ru

Safronov Evgeniy Viktorovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Assistant of the Department «Lifting and Transport Systems»
105005, Moscow, 2–ya Baumanskayaul., 5, str. 1
Ph.: (499) 263–63–91
E–mail: gen-s@mail.ru

Nosko Andrey Leonidovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department «Lifting and Transport Systems»
105005, Moscow, 2–ya Baumanskayaul., 5, str. 1
Ph.: (499) 263–63–91
E–mail: dr.nosko@mail.ru

Potapov Valentin Alekseevich

CJSC ITC «KROS», Ivanteevka
CEO
141281, Moscow region, Ivanteevka, Sanatornyyproyezd,
1, literaH, of. 415
Ph.: (495) 645–34–40
E–mail: potapov@itc-kros.ru

К.Ю. ФЕДОРОВСКИЙ

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОБШИВКУ КОРПУСА СУДНА И ОСОБЕННОСТИ ПРОИСХОДЯЩИХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. Рассмотрены вопросы теплопередачи в судовых обшивочных теплообменных аппаратах. Показано, что данная задача относится к числу задач сопряженного теплообмена, требующая использования граничных условий четвертого рода. Проанализированы возможности и условия перехода при расчётах аппаратов к граничным условиям третьего рода. Это обеспечивает существенное упрощение трудоёмкости расчетов при обеспечении принятой в инженерной практике точности.

Ключевые слова: теплопередача, обшивочный теплообменник, граничные условия, температурное поле.

Введение

Одно из направлений совершенствования систем охлаждения энергетических установок судов связано с внедрением в практику замкнутых схем охлаждения (ЗСО). В этих системах исключается необходимость приема забортной охлаждающей воды, что обеспечивает большую надежность и экологическую безопасность их эксплуатации [1].

Важнейшим элементом ЗСО является конечное устройство теплоотвода, которые передают теплоту охлаждаемого теплоносителя, обычно циркулирующей по замкнутому контуру пресной воды, забортной воде. Такие устройства теплоотвода могут иметь различное конструктивное исполнение. Сохранение обводов корпуса судна обеспечивают применение обшивочных теплообменных аппаратов (ОТОА), осуществляющие теплоотвод через судовую обшивку (рисунок 1). С внутренней стороны судовой обшивки имеется лабиринтный канал, в котором движется пресная охлаждаемая вода. Канал сформирован штатными силовыми элементами набора корпуса судна, судовой обшивкой и дополнительными листами, наваренными параллельно судовой обшивке. ОТОА размещается на подводной части судовой обшивки.

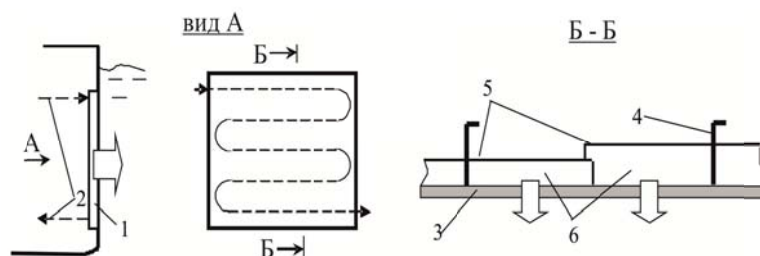


Рисунок 1 – Схема ОТОА:

1 – ОТОА; 2 – подвод и отвод охлаждаемого теплоносителя; 3 – обшивка корпуса судна; 4 – элементы набора корпуса; 5 – дополнительные листы; 6 – лабиринтный канал прохода охлаждаемого теплоносителя

Следует иметь в виду, что при движении судна теплоотдача от наружной поверхности судовой обшивки осуществляется при вынужденной конвекции, а при стоянке судна – при свободной конвекции. Причем в последнем случае теплоотвод резко снижается.

Основная часть.

Рассмотрим особенности теплопередачи в таких аппаратах (рисунок 2). В канале с охлаждаемым теплоносителем подводится теплота Q_n . Часть этой теплоты поступает внутрь корпуса судна Q_b . В процессе теплопередачи принимают участие все силовые элементы набора корпуса судна и дополнительные конструктивные элементы. Суммарный теплоотвод по всем указанным элементам обозначен как Q_o . Судовая обшивка обычно выполняется металлической и имеет толщину около 10 мм, а для судов ледового плавания это значение может достигать 40 мм. В такой стенке имеют место перетечки теплоты $Q_{ок}$ от участков с

большей температурой к участкам с меньшей температурой. Наибольший градиент температуры достигается в местах примыкания ОТОА к необогреваемой части обшивки корпуса судна. В конечном счете, к забортной воде передается теплота Q . Соотношение указанных тепловых потоков определяется конструктивными особенностями ОТОА и местом размещением на судне, температурами и скоростями движения охлаждаемого теплоносителя и забортной воды и т.д.

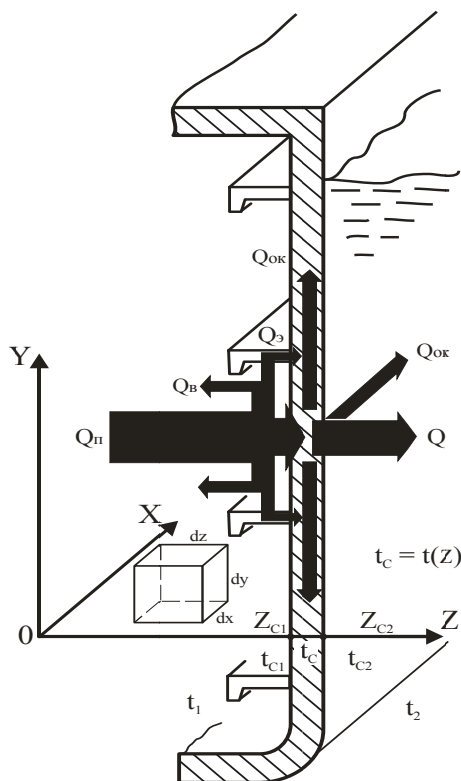


Рисунок 2 – Схема передачи теплоты через судовую обшивку

Принимая во внимание характер движения охлаждаемого теплоносителя, наличие перетечек теплоты и др., на поверхности судовой обшивки формируется достаточно сложное температурное поле (рисунок 3).

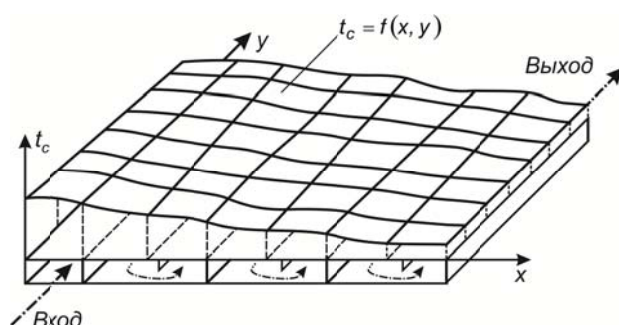


Рисунок 3 – Температурное поле на поверхности судовой обшивки

Примем теплофизические свойства жидкости постоянными. Теплота трения не учитывается. В случае стационарного процесса для рассматриваемой системы (рис. 2.4) передача теплоты описывается следующими дифференциальными уравнениями в безразмерном виде:

$$Re_1 \left(\tilde{v}_{1x} \frac{\partial \tilde{v}_{1x}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_{1y} \frac{\partial \tilde{v}_{1x}}{\partial \tilde{y}} + \tilde{v}_{1z} \frac{\partial \tilde{v}_{1x}}{\partial \tilde{z}} \right) = \nabla^2 \tilde{v}_{1x} - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} (Eu_1 Re_1) + \frac{Gr_1}{Re_1} \tilde{\Theta}_1, \quad \frac{\partial \tilde{v}_{1x}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}_{1y}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{v}_{1z}}{\partial \tilde{z}} = 0,$$

$$Pe_1 \left(\tilde{v}_{1x} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_{1y} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tilde{y}} + \tilde{v}_{1z} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tilde{z}} \right) = \nabla^2 \Theta_1.$$

Для металлической стенки обшивки корпуса, считая $\lambda_c = const$, запишем:

$$\nabla^2 \Theta_c = 0.$$

С наружной стороны судовой обшивки

$$Re_2 \left(\tilde{v}_{2x} \frac{\partial \tilde{v}_{2x}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_{2y} \frac{\partial \tilde{v}_{2x}}{\partial \tilde{y}} + \tilde{v}_{2z} \frac{\partial \tilde{v}_{2x}}{\partial \tilde{z}} \right) = \nabla^2 \tilde{v}_{2x} - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} (Eu_2 Re_2) + \frac{Gr_2}{Re_2} \tilde{\Theta}_2, \quad \frac{\partial \tilde{v}_{21x}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}_{2y}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{v}_{2z}}{\partial \tilde{z}} = 0,$$

$$Pe_2 \left(\tilde{v}_{2x} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_{2y} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tilde{y}} + \tilde{v}_{2z} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tilde{z}} \right) = \nabla^2 \Theta_2,$$

где $\tilde{v}_x = \frac{v_x}{v}; \quad \tilde{v}_y = \frac{v_y}{v}; \quad \tilde{v}_z = \frac{v_z}{v}; \quad \tilde{x} = \frac{x}{l}; \quad \tilde{y} = \frac{y}{l}; \quad \tilde{z} = \frac{z}{l};$

$$\Theta_1 = \frac{t_1 - t_{c1}}{t_{1\infty} - t_{c1}}; \quad \Theta_c = \frac{t_c - t_{c2}}{t_{c1} - t_{c2}}; \quad \Theta_2 = \frac{t_{c2} - t_2}{t_{c2} - t_{2\infty}};$$

$$Re = \frac{vl}{\nu}; \quad Eu = \frac{\Delta P}{\rho v^2}; \quad Gr = \frac{g \beta \Delta t l^3}{\nu^2}; \quad Pe = \frac{vl}{a};$$

l – характерный размер, v – скорость, ν – кинематический коэффициент вязкости.

Граничные условия имеют вид:

при $\tilde{z} = z_{c1} \quad \tilde{v}_{1x} = \tilde{v}_{1y} = \tilde{v}_{1z} = 0;$

при $\tilde{z} = z_{c2} \quad \tilde{v}_{2x} = \tilde{v}_{2y} = \tilde{v}_{2z} = 0.$

Условия сопряжения температур

$$\Theta_1|_{\tilde{z}_{c1}} = \Theta_c|_{\tilde{z}_{c1}},$$

$$\Theta_c|_{\tilde{z}_{c2}} = \Theta_2|_{\tilde{z}_{c2}}.$$

Другое условие сопряжения связано с равенством локальных плотностей тепловых потоков в жидкости и стенке на внутренней поверхности $q_1|_{\tilde{z}_{c1}} = q_c|_{\tilde{z}_{c1}}$ и на наружной поверхности $q_{\bar{n}}|_{\tilde{z}_{c2}} = q_2|_{\tilde{z}_{c2}}.$

Это условие может быть представлено следующим образом:

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial z}|_{z_{c1}} = \lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial z}|_{z_{c1}};$$

$$\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial z}|_{z_{c2}} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial z}|_{z_{c2}}.$$

Для внутренней поверхности указанное условие при линейном распределении температуры по толщине стенки приближенно может быть записано:

$$\frac{(\Delta t_c)_{\delta_c}}{(\Delta t_1)_{\delta_{1T}}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \frac{\delta_c}{\delta_{1T}} = \Theta^*, \quad (1)$$

где δ_c и δ_{1T} соответственно толщина стенки и толщина теплового пограничного слоя.

Таким образом, отношение перепада температуры по толщине стенки $(\Delta t)_{\delta_c}$ к перепаду температуры в пограничном слое жидкости $(\Delta t)_{\delta_{1T}}$ зависит не только от λ_1/λ_c , но и от отношения δ_c/δ_{1T} . При этом толщина теплового пограничного слоя δ_{1T} зависит от скорости движения жидкости, ее вязкости и изменяется вдоль направления движения. В [2] А.В. Лыков показал, что

$$\Theta^* = A \cdot Br_x,$$

где A – постоянная.

Для вынужденной конвекции

$$Br_x = \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \frac{\delta_c}{x} Pr^{n_1} Re_x^{n_2}.$$

При ламинарном режиме $n_1 = 1/3$, $n_2 = 0,5$, а при турбулентном $n_2 = 0,2$.

В случае свободной конвекции

$$Br_x = \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \frac{\delta_c}{x} (Pr Gr_x)^k.$$

При $Pr \cdot Gr_x = 10^2 \dots 10^7$ имеем $k = 0,25$.

Величина Br_x называется числом Брюна и используется для оценки сопряженности задачи конвективного теплообмена. Значение Br_x пропорционально отношению термического сопротивления теплового пограничного жидкости к термическому сопротивлению стенки твердого тела. Сказанное полностью справедливо и для наружной поверхности судовой обшивки.

Указанные условия сопряжения соответствуют граничным условиям четвертого рода. Рассматриваемая задача относится к числу сопряженных задач теплообмена, решение которых, как отмечается в [2], связано с преодолением ряда принципиальных математических трудностей. В таких условиях закон Ньютона $q = \alpha \cdot \Delta t$ (граничные условия третьего рода), строго говоря, теряет физический смысл. Однако, в инженерной практике использование коэффициента теплоотдачи получило широкое распространение, поскольку применяемые при этом зависимости сравнительно просты и обеспечивают приемлемую точность расчетов. В [3] отмечено, что в ряде случаев, тем не менее, возможно применение в качестве характеристики процесса коэффициента теплоотдачи. При $Br_x < 0,07$ различие в результатах сопряженного и несопряженного решений не превышает 5...10%. Выполненные применительно к ОТОА оценки числа Br_x показывают, что это число меньше 0,003, что позволяет применять понятие «коэффициент теплоотдачи» и перейти к граничным условиям третьего рода.

Процессы теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях судовой обшивки находятся во взаимосвязи. Учитывая, что $Nu \approx x / \delta_{1T}$ [2], то выражение (1) преобразуется к виду

$$\frac{(\Delta t_c)_{\delta_c}}{(\Delta t_1)_{\delta_{10}}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \cdot \frac{\delta_c}{x} Nu_{x1}.$$

Тогда для наружной поверхности при свободной конвекции

$$\frac{(\Delta t_c)_{\delta_{\bar{n}}}}{(\Delta t_2)_{\delta_{20}}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_c} \cdot \frac{\delta_c}{x} A_2 (Pr \cdot Gr_x)^k,$$

и для вынужденной конвекции

$$\frac{(\Delta t_c)_{\delta_{\bar{n}}}}{(\Delta t_2)_{\delta_{20}}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_c} \cdot \frac{\delta_c}{x} B_2 Pr^{n1} Re_x^{n2}.$$

После всех преобразований получаем для неподвижного судна

$$Nu_{x1} = \frac{(\Delta t_2)_{\delta_{20}}}{(\Delta t_1)_{\delta_{10}}} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} A (Pr \cdot Gr_x)^k.$$

Для движущегося судна

$$Nu_{x1} = \frac{(\Delta t_2)_{\delta_{20}}}{(\Delta t_1)_{\delta_{10}}} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} B \cdot Pr^{n1} Re_x^{n2}.$$

Таким образом при данном подходе, при использовании коэффициентов теплоотдачи на одной из поверхностей наблюдается их зависимость от условий теплоотдачи на другой поверхности. Отсюда вытекает, что применять для теплотехнических расчетов ОТОА рекомендованные авторами зависимости для изотермических поверхностей и каналов, строго говоря, недопустимо. Должны быть проведены специальные исследования процессов теплопередачи в ОТОА [4]. Причем отмеченная взаимосвязь процессов теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях говорит о том, что необходимы экспериментальные исследования, в ходе которых требуется моделировать все устройство теплоотвода, а не его отдельные части. Этим воспроизводятся все особенности происходящих процессов. Полученные таким образом зависимости для чисел Нуссельта на внутренней и наружной поверхностях позволяют при их использовании (сопряжении) в расчетах коэффициента теплопередачи в конечном счете достаточно корректно определить теплоотвод в ОТОА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоровский К.Ю. природоохранная технология обеспечения охлаждения судовой энергетической установки / К.Ю.Федоровский, Н.К.Федоровская // Сб. науч. тр. Гос. университета морского и речного флота имени С.О. Макарова. – С.Петербург, –2016. – с. 356–362.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с
3. Калинин Э.К. Методы расчета сопряженных задач теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.
4. Федоровский К.Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская. – Москва.: ИНФРА–М, 2017. –163с.

Федоровский Константин Юрьевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений»,
299053, Севастополь, ул. Университетская 33.
тел. +79787096617,
E-mail: fedkonst@rambler.ru

K.Yu. FEDOROVSKIY

HEAT TRANSFER THROUGH SHIP'S SHELL PLATING AND PECULIARITIES OF THE PROCESSES

Abstract. *The issues of heat transfer in ship shell heat exchangers are considered. It is shown that this problem belongs to the number of problems of conjugate heat exchange, which requires the use of boundary conditions of the fourth kind. The possibilities and conditions of the transition in the calculation of apparatuses to boundary conditions of the third kind are analyzed. This provides a significant simplification of the complexity of calculations while ensuring accuracy in engineering practice.*

Keywords: *heat transfer, shell heat exchanger, boundary conditions, temperature field/*

BIBLIOGRAPHY

1. Fedorovsky K.Yu. Environmental protection technology for cooling the ships power plant / K.Yu. Fedorovskiy, N.K.Fedorovskaya // Sat. sci. tr. Gos. University of the Marine and River Fleet named after S.O. Makarov. – S.Peterburg, –2016. – P. 356–362.
2. Lykov A.V. Heat and mass transfer / A.B. Lykov. – Moscow: Energia, –1978. – 480p.
3. Kalinin E.K. Methods for calculating the conjugate problems of heat transfer / E.K. Kalinin, G.A. Dreitser. – Moscow: Mechanical Engineering, – 1983. – 232 p.
4. Fedorovsky K.Yu. Closed cooling systems for ship power plants / K.Yu. Fedorovsky, N.K. Fedorovskaya. – Moscow: INFRA–M, –2017. –163p

Fedorovskiy Konstantin Yuryevich

Sevastopol State University Sevastopol,
Doctor of Techn. Sciences, Professor,
Head of department Power plants marine vessels and structures,
299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33,
Tel. +79787096617,
E-mail: fedkonst@rambler.ru

О.В. ФИЛИПОВИЧ

МОДЕЛЬ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Рассматривается технологический процесс селективной сборки как совокупность нескольких взаимосвязанных этапов. Приводится схема комплектования двух независимых элементов по двум параметрам и схема образования многомерной селективной группы. Производится построение математической модели процесса комплектования и сборки элементов, оперирующей многомерными группами и позволяющей при выбранной стратегии определить суммарную вероятность получения годных сборочных комплектов, вероятность появления некомплектных элементов, образующих незавершенное производство и предварительный брак. Приводятся различные стратегии комплектования, определяемые обобщенными правилами, под которыми понимается способ формирования комплектов из элементов различных селективных групп. Дополнительно перечислены возможные варианты стратегий для сборки многопараметрических изделий, рассмотрены их характеристики. В качестве перспективы дальнейших исследований предлагается решение задачи оптимизации процесса одновременного комплектования двух элементов по двум параметрам.

Ключевые слова: двухпараметрическое комплектование, селективная сборка, математическая модель.

Введение

Методы групповой взаимозаменяемости являются единственно возможным вариантом, применяемым для обеспечения заданной точности выходных параметров некоторых прецизионных изделий механики, электроники и оптики, например, в подшипниковой промышленности, дизелестроении, машиностроении, часовой промышленности. Особую сложность представляет их использование для комплектования многопараметрических объектов, что требует применения системного подхода, базирующегося на комплексном описании всех характеристик процесса, а также разработки его математического обеспечения. Достижение заданной точности при сборке изделий по нескольким параметрам усложняется как в отношении организации процесса, так и экономической целесообразностью. Первые работы в области комбинирования селективной сборки и пригонки для многозвенной размерной цепи с сопряжением по нескольким параметрам проводились И.А. Когановым [1]. Фундаментальной теоретической работой, посвященной вопросам селективной сборки, является монография [2], в которой авторы предлагают новую методологию решения задач, связанных с указанным процессом, основанную на системном подходе и алгоритмическом методе анализа и синтеза. Здесь рассматриваются как традиционные, так и более сложные задачи, связанные с многопараметрической сборкой двух и более деталей. Дальнейшее развитие исследований, связанных с одно- и многопараметрическим селективным комплектованием и учетом влияния на данный процесс различных случайных факторов, положили работы [3...16]. Технологический процесс селективной сборки предлагается рассматривать как совокупность пяти взаимосвязанных этапов.

1. Изготовление элементов.
2. Измерение параметров.
3. Сортировка элементов по селективным группам.
4. Комплектование.
5. Сборка.

Большинство известных из литературы моделей многопараметрической селективной сборки построены с учетом определенных допущений, снижающих достоверность, и традиционно охватывают только один или несколько смежных этапов технологического процесса. Поэтому задача создания стохастических моделей, позволяющих учесть особенности процесса в целом и каждого этапа в отдельности, является актуальной.

Основная часть

В данной работе рассматриваются последние два этапа без учета взаимосвязи с первыми тремя. Целью статьи является разработка обобщенной аналитической модели процесса двухпараметрической селективной сборки двух элементов.

Сопряжение элементов по нескольким параметрам нередко встречается в машиностроении и приборостроении [1,2,3,17]. Примером может служить случай сборки распылителей форсунок дизельных двигателей, где выходными показателями являются диаметральный зазоры между иглой и отверстием в корпусе распылителя и ход иглы. В [2] решена задача разработки системы автоматического двухпараметрического комплектования указанного узла по действительным размерам.

Рассмотрим сборку двух элементов, каждый из которых характеризуется параметрами x_{is} ($i = \overline{1,2}$, $s = \overline{1,2}$). Схема подобного комплектования приведена на рисунке 1.

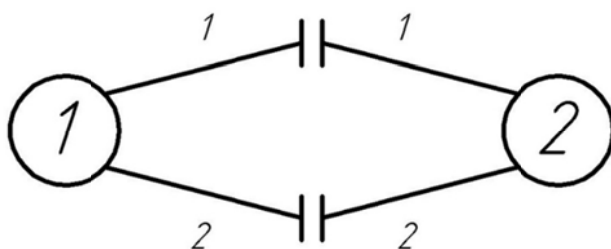


Рисунок 1 – Схема двухпараметрического комплектования двух элементов

В данной схеме использованы условные графические обозначения, предложенные в [2]: кружок соответствует отдельному элементу, цифра в кружке – номеру элемента, каждая линия, выходящая из кружка и заканчивающаяся черточкой – одному из параметров. Объединение черточек в группы (в данном случае – две параллельные черточки) показывает, что параметры элементов связаны условиями собираемости и качества.

Элементы изготавливаются независимо друг от друга, параметры в общем случае могут быть коррелированы. Соответствующие двумерные распределения параметров изделий считаются известными и обозначаются $f_i(x_i)$. В случае независимости параметров друг от друга можно записать

$$f_i(x_i) = \prod_{s=1}^2 f_{is}(x_{is}) = f_{i1}(x_{i1}) f_{i2}(x_{i2}), \quad i = \overline{1,2}.$$

Выходные параметры изделий связаны со входными известными функциональными зависимостями

$$y_s = g(x_{is}), \quad i = \overline{1,2}, \quad s = \overline{1,2},$$

причем в большинстве случаев такая зависимость является линейной, т.е.

$$y_s = \sum_{i=1}^2 b_{is} x_{is}, \quad s = \overline{1,2},$$

где b_{is} – известные константы.

Интервалы допусков селективных групп отдельно для каждого из параметров элементов по аналогии с [2] будем обозначать $X_i^{(k_{is})}$, где k_{is} – номер группы параметра s элемента i -го типа (рисунок 2). Предельные отклонения a_{is} селективных групп разбивают всю область значений параметров на l_{is} интервалов $X_i^{(k_{is})}$, каждый из которых имеет границы $(a_i^{(k_{is})}; a_i^{(k_{is}+1)})$.

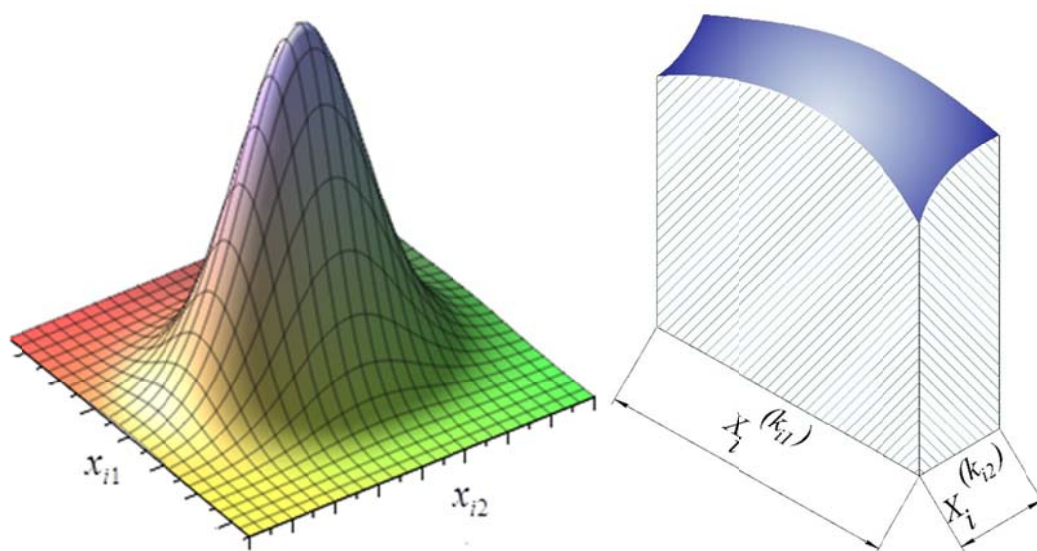


Рисунок 2 – Схема образования многомерной селективной группы

Многомерные селективные группы с номерами $K_i = (k_{i1}, k_{i2})^T$, в пространстве параметров элементов i -го типа образуются как прямое произведение множеств $X_i^{(k_{i1})} \times X_i^{(k_{i2})}$, в результате которого получается упорядоченная пара. Число групп по каждому параметру каждой из элементов i -го типа равно

$$k_{is} = \overline{1, l_{is}},$$

общее число значений вектора K_i при этом равно $l_{i1}l_{i2}$.

В многомерную группу K_i попадают элементы i -го типа, параметры которых одновременно удовлетворяют требованиям

$$x_{i1} \in X_i^{(k_{i1})}, x_{i2} \in X_i^{(k_{i2})}.$$

Доля таких элементов из общего количества определяется по формуле

$$I_i^{(K_i)} = \int_{X_i^{(k_{i1})}} \int_{X_i^{(k_{i2})}} f_i(x_i) dx_i, i = \overline{1, 2}.$$

В частном случае при независимости параметров друг от друга

$$I_i^{(K_i)} = \prod_{s=1}^2 I_i^{(k_{is})}, i = \overline{1, 2}$$

где $I_i^{(k_{is})}$ – число элементов i -го типа, параметр s которых принадлежит одномерной k_{is} -й группе $X_i^{(k_{is})}$,

$$I_i^{(k_{is})} = \int_{a_i^{(k_{is})}}^{a_i^{(k_{is}+1)}} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

Тогда в группы с условными номерами 1 и l_{is} , лежащими за пределами границ допусков элементы попадают с вероятностями

$$I_i^{(1_{is})} = \int_{-\infty}^{a_i^{(2_{is})}} f_{is}(x_{is}) dx_{is}, I_i^{(l_{is})} = \int_{a_i^{(l_{is})}}^{\infty} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

Сумма этих вероятностей составляет вероятность предварительного брака, элементы из указанных групп исключены из процесса комплектования.

При заданном разбиении на группы собираемость зависит от стратегии комплектования, определяемой правилами формирования сборочных комплектов (СК). В [2] предлагается процесс комплектования описывать обобщенными правилами, под которыми понимается способ формирования СК из элементов различных селективных групп. В общем

случае все они являются многовариантными (когда в СК включаются элементы в различных комбинациях). Частным случаем является одновариантное комплектование, когда элементы из одной группы могут входить в сборочный комплект только одного типа. Для описания многовариантного комплектования определим множество величин

$$\Lambda = \left\{ \lambda_{iK_i}^{(k)}, i = \overline{1, 2}, k = \overline{1, L} \right\},$$

в котором $\lambda_{iK_i}^{(k)}$ определяет долю элементов i -го типа группы K_i , включаемой в СК k -го типа. Отметим, что для комплектования изделий используются группы, соответствующие годным элементам по каждому из параметров. Величины $\lambda_{iK_i}^{(k)}$ удовлетворяют следующему условию

$$\sum_{k=1}^L \lambda_{iK_i}^{(k)} \leq 1.$$

и лежат в пределах $[0, 1]$.

Вероятность получения СК k -го типа можно определить соотношением

$$I_{CK}^{(k)} = \min \left\{ I_i^{(K_i)} \lambda_{iK_i}^{(k)} \right\} = \min \left\{ I_1^{(K_1)} \lambda_{1K_1}^{(k)}; I_2^{(K_2)} \lambda_{2K_2}^{(k)} \right\}, k = \overline{1, L}.$$

Суммарная вероятность получения годных СК по всем селективным группам составляет

$$I_{CK} = \sum_k I_{CK}^{(k)}.$$

Вероятность появления некомплектных элементов, образующих незавершенное производство и предварительный брак, равна

$$P_{НБ} = 1 - I_{CK}.$$

Имея полученные соотношения, возможно поставить ряд оптимизационных задач, для решения которых в качестве основного критерия может рассматриваться как получение максимально возможного числа сборочных комплектов, так и сведение к минимуму количества некомплектных элементов. Варьируемыми переменными задачи могут являться величины расширенных и групповых допусков, количество селективных групп и их границы, веса комплектования, а также параметры технологического оборудования и транспортно-складской системы.

Также в [2] отмечено, что для многопараметрической селективной сборки элементов стратегия комплектования помимо весовых правил сводится выбору одного из двух вариантов.

1. Комплектование с одновременным подбором всех параметров элементов и весов.
2. Последовательное комплектование. Элементы сначала подбирают по одному из параметров, а затем – по другому. Данный вариант отличается простотой, но приводит к значительному росту незавершенного производства.

Заключение

Таким образом, построена обобщенная модель процесса многопараметрического комплектования и сборки, оперирующая многомерными группами. Перспективой исследований является решение задачи оптимизации процесса одновременного комплектования. Следует отметить, что для случая многовариантной стратегии такая задача имеет огромную размерность, однако, ее возможно решить, используя современный математический аппарат, программное обеспечение и вычислительные ресурсы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта №18-48-920014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коганов И.А. Оптимизация подбора деталей, сопрягаемых при сборке по большому количеству поверхностей // И.А. Коганов // Прогрессивная технология машиностроения. Вып.3. – Тула: Изд-во ТПИ, 1968. – С.17–19.

2. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки /В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
3. Сердобинцев Ю.П. Оптимизированный выбор сборочных комплектов при многовариантных схемах размерного комплектования /Ю.П. Сердобинцев, Л.А. Рабинович, А.В. Савичев //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2006. – №3. – С. 37–39.
4. Кесоян А.Г. Влияние погрешности формы сопрягаемых поверхностей на точность прецизионной сборки при групповой взаимозаменяемости деталей /А.Г. Кесоян, Л.А. Рабинович, С.И. Голуб //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2007. – Т. 1., №3 (29). – С. 54–56.
5. Кесоян А.Г. Исследование влияния погрешности измерения деталей на собираемость прецизионных соединений /А.Г. Кесоян, Л.А. Рабинович, Н.В. Кобзев //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2009. – Т.5. – №8(56). – С. 92–98.
6. Филипович О.В. Оценка нижней границы незавершенного производства при двухпараметрической селективной сборке /О.В. Филипович, В.Я. Копп // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Изд-во «Инновационное машиностроение». – №11, 2010. – С.16–20.
7. Kopp V. Control by parameters of the selective assembling /V. Kopp, N. Serova, O. Filipovich // Modelling of Manufacturing Processes – Lublin: Lubling University of Technology Institute of Technological Systems of Information, 2008. – Vol. 4, №1. – P. 80 – 97.
8. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий /М.Н. Сорокин, Ю.Н. Ануров //Сборка в машиностроении, приборостроении, 2011. – №8. – С. 75–82.
9. Филипович О.В. Имитационная модель процесса однопараметрической селективной сборки /О.В. Филипович, В.Я. Копп, М.И. Гарматюк //Сборка в машиностроении и приборостроении. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2012. – №5. – С.81–90.
10. Филипович О.В. Управление параметрами селективной сборки двух деталей /О.В. Филипович, Г.В. Невар, М.И. Гарматюк и др. //Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015.– С. 144–150.
11. Филипович О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования /О.В. Филипович, Г.В. Невар //Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9–1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017.– С. 428–437.
12. D. Mease, A. Sudjinato, and V.N. Nair. Selective assembly in manufacturing: statistical issues and optimal binning strategies. *Technometrics*, 46/2:165–175, 2004.
13. S.M. Kannan, A. Asha, and V. Jayabalan. A new method in selective assembly to minimize clearance variation for a radical assembly using genetic algorithm. *Quality Engineering*, 17 (4):595607, 2005.
14. Nobuo Shinozaki, Shun Matsuura. Optimal binning strategies under squared error loss in selective assembly with measurement error. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, Volume 36, Issue 16:2863–2876, 2007.
15. S.M. Kannan, A.K. Jeevanantham, and V. Jayabalan. Modeling and analysis of selective assembly using taguchis loss function. *International Journal of Production Research*, 46/16: 4309–4330, 2008.
16. Matsuura and N. Shinozaki. Shifting the process mean to minimize surplus components and unacceptable products in selective assembly. *Journal of quality*, 18/2:87–100, 2011.
17. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов /П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232с.

Филипович Олег Викторович

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Приборные системы и автоматизация технологических процессов»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 55–00–77
E-mail: filipovich@sevsu.ru

O.V. FILIPOVICH

THE MODEL OF TWO-PARAMETER SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS

Abstract. *The technological process of selective assembly as a set of several interrelated stages is considered. The scheme of completion of two independent elements on two parameters and the scheme of formation of a multidimensional selective group is given. The construction of a mathematical model of the process of completion and assembly of elements, operating in multi-dimensional groups and allowing for the selected strategy to determine the total probability of obtaining accepted assembled sets, the probability of incomplete elements, forming work in progress and preliminary scrappage. Various completion strategies are given, defined by generalized rules, which means the*

method of forming sets of elements from different selective groups. In addition, the possible strategies for the assembly of multiparameter products are listed, their characteristics are considered. As a prospect for further research the solution of the process optimization problem is proposed.

Keywords: two-parameter completion, selective assembly, mathematical model.

BIBLIOGRAPHY

1. Koganov I.A. Optimizatsiya podbora detaley, sopryagayemykh pri sborke po bolshomu kolichestvu poverkhnostey /I.A. Koganov //Progressivnaya tekhnologiya mashinostroyeniya. Vyp.3. – Tula: Izd-vo TPI, 1968. – S.17–19.
2. Katkovnik V.YA. Osnovy teorii selektivnoy sborki /V.YA. Katkovnik, A.I. Savchenko. – L.: Politehnika, 1991. – 303 s.
3. Serdobintsev YU.P. Optimizirovannyi vybor sborochnykh komplektov pri mnogovariantnykh skhemakh razmernogo komplektovaniya /YU.P. Serdobintsev, L.A. Rabinovich, A.V. Savichev //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006. – №3. – S. 37–39.
4. Kesoyan A.G. Vliyaniye pogreshnosti formy sopryagayemykh poverkhnostey na tochnost pretsizionnoy sborki pri gruppovoy vzaimozamenyayemosti detaley /A.G. Kesoyan, L.A. Rabinovich, S.I. Golub //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007. – T. 1., №3 (29). – S. 54–56.
5. Kesoyan A.G. Issledovaniye vliyaniya pogreshnosti izmereniya detaley na sobirayemost pretsizionnykh soyedineniy /A.G. Kesoyan, L.A. Rabinovich, N.V. Kobzev //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009. – T.5. – №8(56). – S. 92–98.
6. Filipovich O.V. Otsenka nizhney granitsy nezavershennogo proizvodstva pri dvukhparametricheskoy selektivnoy sborke /O.V. Filipovich, V.YA. Kopp // Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii. – M.: Izd-vo «Innovatsionnoye mashinostroyeniye». – №11, 2010. – S.16–20.
7. Kopp V. Control by parameters of the selective assembling /V. Kopp, N. Serova, O. Filipovich // Modelling of Manufacturing Processes – Lublin: Lubling University of Technology Institute of Technological Systems of Information, 2008. – Vol. 4, №1. – R. 80 – 97.
8. Sorokin M.N., Anurov YU.N. Formalizatsiya metoda mezhgruppovoy vzaimozamenyayemosti pri realizatsii selektivnoy sborki izdeliy /M.N. Sorokin, YU.N. Anurov //Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii, 2011. – №8. – S. 75–82.
9. Filipovich O.V. Imitatsionnaya model protsessa odnparametricheskoy selektivnoy sborki /O.V. Filipovich, V.YA. Kopp, M.I. Garmatyuk //Sborka v mashinostroyenii i priborostroyenii. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 2012. – №5. – S.81–90.
10. Filipovich O.V. Upravleniye parametrami selektivnoy sborki dvukh detaley /O.V. Filipovich, G.V. Nevar, M.I. Garmatyuk i dr. //Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Vyp. 10. – Tula: Izd-vo TulGU, 2015.– S. 144–150.
11. Filipovich O.V. Otsenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoy sborki s pomoshchyu imitatsionnogo modelirovaniya /O.V. Filipovich, G.V. Nevar //Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Vyp. 9–1. – Tula: Izd-vo TulGU, 2017.– S. 428–437.
12. D. Mease, A. Sudjinato, and V.N. Nair. Selective assembly in manufacturing: statistical issues and optimal binning strategies. *Technometrics*, 46/2:165–175, 2004.
13. S.M. Kannan, A. Asha, and V. Jayabalan. A new method in selective assembly to minimize clearance variation for a radical assembly using genetic algorithm. *Quality Engineering*, 17 (4):595607, 2005.
14. Nobuo Shinozaki, Shun Matsuura. Optimal binning strategies under squared error loss in selective assembly with measurement error. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, Volume 36, Issue 16:2863–2876, 2007.
15. S.M. Kannan, A.K. Jeevanantham, and V. Jayabalan. Modeling and analysis of selective assembly using taguchis loss function. *International Journal of Production Research*, 46/16: 4309–4330, 2008.
16. Matsuura and N. Shinozaki. Shifting the process mean to minimize surplus components and unacceptable products in selective assembly. *Journal of quality*, 18/2:87–100, 2011.
17. Bulovskiy P.I. Avtomatizatsiya selektivnoy sborki priborov /P.I. Bulovskiy, G.V. Krylov, V.A. Lopukhin. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1978. – 232s.

Filipovich Oleg Viktorovich

Sevastopol State University, Sevastopol

Ph.D., Associate professor, Head of the Department «Instrument Systems and Automation of Technological Processes»

299053, Sevastopol, Universitetskaya st., 33

Ph. 55–00–77

E-mail: filipovich@sevsu.ru

С.М. БРАТАН, Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ, А.О. ХАРЧЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ЧЕРЕЗ ОСНОВАНИЕ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

Аннотация. В статье рассмотрены результаты теоретических исследований процесса шлифовальной обработки с учетом воздействий на технологическую систему станка факторов окружающей среды, вызывающих через основание плавучей мастерской возмущающие вибрационные воздействия. Воздействие морского волнения на плавучее основание проявляется в форме горизонтально-продольных колебаний, горизонтально-поперечных колебаний, вертикальных перемещений, бортовой и килевой качки, а также рыскания. Векторно-матричные уравнения являются стандартной формой описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволило ее использовать для анализа процесса и синтеза систем управления. Такой подход позволил к разработанной ранее модели динамической системы шлифовального станка построить формирующий фильтр – динамическое звено, синтезирующее динамику вибрационных воздействий на станок от внешней среды через основание плавучей мастерской.

Ключевые слова: плавучая мастерская, шлифовальный станок, финишная обработка, динамическая система, формирующий фильтр.

Введение.

Промышленность приморских городов с развитыми судостроением и судоремонтом характеризуется наличием мобильных мини-заводов в виде плавучих мастерских с размещенными на палубах производственными участками, в том числе и механообрабатывающими, имеющими широкий парк станочного оборудования, включающий шлифовальные станки. Такие объекты способны выполнять сложные работы по изготовлению и модернизации высокотехнологичных изделий, узлов и агрегатов, в том числе в удалённых от основных пунктов базирования районах. При этом особенностью эксплуатации станочного оборудования является наличие вибраций, вызванных воздействием различных источников, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей в ходе технологического процесса [1].

Повышение качества обработки деталей в условиях плавучих мастерских непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, в том числе и от воздействий внешней среды – волнений водной поверхности.

Основная часть.

На палубах плавучих мастерских фиксация станков обеспечивается бетонным фундаментом и металлическими растяжками (между станиной и поверхностью палубы), не обеспечивающих достаточной виброизоляции вследствие значительных внешних колебательных воздействий (рисунок 1). Эти воздействия до настоящего времени являются малоизученными и их влияние на качество обработки, в особенности на финишных операциях, усложненных колебательными процессами разного уровня, недостаточно исследовано.

В работах [2, 3] выполнено моделирование взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки в условиях плавучих мастерских. Рассмотрена динамическая система со сложными стационарными и нестационарными вибрационными воздействиями, а также ударными воздействиями от внешнего оборудования и длительного морского волнения через плавучее основание и поверхность палубы.

На основе системного подхода предложена структура операции, сформулированы основные положения и методы анализа процесса; определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем.

Целью данной статьи является определение динамических характеристик несущей системы станка, а именно, амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, для чего необходимо дополнительно исследовать влияние на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил действующего на плавучее основание мастерской.



а



б



в

Рисунок 1– Пример плавучей мастерской (а) и установка в ней круглошлифовального (б) и плоскошлифовального (в) станков на фундаментах с растяжками по периметру

В процессе функционирования на плавучее основание воздействуют возмущающие силы ветра, течения и морского волнения. Воздействие ветра может быть оценено путем измерения скорости и направления ветра румбоанемометрами, установленными на плавучем основании, и расчета аэродинамических сил по известным соотношениям [4, 5]:

$$F_{XB} = C_{XB}(\beta) \rho_B S_{XB} v_B^2 / 2; F_{YB} = C_{YB}(\beta) \rho_B S_{YB} v_B^2 / 2; M_{ZB} = C_{MB}(\beta) \rho_B S_{YB} L_B v_B^2 / 2, \quad (1)$$

где C_{XB} , C_{YB} , C_{MB} , – аэродинамические коэффициенты плавучего основания – функции от угла ветра β ;

ρ_B – удельная плотность воздуха;

v_B – скорость ветра относительно плавучего основания;

S_{XB} , S_{YB} , L_B – эффективные площади сопротивления и характерная длина судна.

Параметры S_{XB} , S_{YB} , L_B , $C_{XB}(\beta)$, $C_{YB}(\beta)$, $C_{MB}(\beta)$ могут быть с достаточной точностью определены при испытаниях масштабных моделей и уточнены при экспериментах.

Скорость ветра определяется суммой следующих составляющих:

$$v_B = v_{BO} + v_{TO} + v_{TB}, \quad (2)$$

где v_{BO} – средняя скорость ветра;

v_{TO} – турбулентная составляющая;

v_{TB} – волновая составляющая.

Как турбулентная, так и волновая составляющие являются стационарными центрированными функциями времени [5]. Волновая составляющая скорости ветра определяется морским волнением [6]. Ее корреляционная функция практически совпадает с соответствующей характеристикой волновых ординат, отличаясь дисперсией.

Воздействие морского волнения на плавучее основание проявляется в форме горизонтально-продольных колебаний, горизонтально-поперечных колебаний, вертикальных перемещений, бортовой и килевой качки, а также рыскания. Соотношения между видами качки зависят как от параметров плавучего основания, так и от его расположения относительно генерального направления бега волн. Соотношения между различными видами

качки и их амплитуды для плавучего основания, удерживающегося в заданной точке или перемещающегося предельно малыми ходами, зависят от курсового угла и эффективного угла волнового склона:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_0 \sin x, \quad (3)$$

где x – курсовой угол волны относительно направления распространения волны;

ε_0 – угол волнового склона в заданной точке.

Согласно существующим представлениям [6, 7, 8] морское волнение являет собой суперпозицию большого числа плоских (двумерных) волновых систем, распространяющихся под различными углами к генеральному направлению бега волн. Последнее, в случае ветров постоянного направления, через 4...6 часов совпадает с направлением ветра. В достаточно удаленных от берегов районах в условиях действия ветра постоянной интенсивности наблюдается развитое морское волнение. Поведение ординаты волнового профиля в любой заданной точке развитого морского волнения характеризуется случайной стационарной центрированной функцией $r_B(t)$ с нормальным законом распределения.

Математическое описание ветрового волнения производится на основе обработки и аппроксимации экспериментальных данных. К настоящему времени из известных форм представления спектра волнения наиболее распространенным является спектр, предложенный Международной конфедерацией опытовых бассейнов (МКОБ):

$$S(w) = Aw^{-5} \exp(-Bw^4), \quad (4)$$

где $A = 8,1 \cdot 10^{-3} g^2$,

$$B = 3,11 \cdot h_{1/3}^2,$$

g – ускорение силы тяжести в заданной точке;

$h_{1/3}$ – высота волны 1/3 обеспеченности;

w – угловая частота волнения.

Для задач синтеза системы автоматического управления и входящих в их состав измерительных подсистем необходимо построение формирующих фильтров, позволяющих получать на выходе процессы с заданными характеристиками, что является целью настоящей работы. Такие фильтры известными методами могут быть достаточно просто построены для процессов, характеризуемых спектральными плотностями с дробно-рациональным описанием [9, 10]. Аппроксимация спектров двумерного морского волнения, удовлетворяющего указанным требованиям, имеет вид [8]:

$$S_r = \frac{2D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (5)$$

где D_r – дисперсия волновой ординаты,

$$D_r = 0,143(0,5 \cdot h_{3\%})^2, \text{ м}^2;$$

$$\alpha = 0,21\beta;$$

$h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности, м.

Высота волны 3 % обеспеченности определяется степенью морского волнения в соответствии со шкалой ГУ ГМС (Регистра) [11], часть которой для наиболее важного диапазона условий, встречающихся при функционировании плавучей мастерской, приведена в таблице 1.

Параметр β связан с частотой максимума спектра развитого волнения зависимостью:

$$\beta = 0,82 \overline{w}_m, \quad (6)$$

где частота максимума спектра $\overline{w}_m$ определяется соотношением:

$$\overline{w}_m = 1,74 h_{3\%}^{+0,4}, \quad (7)$$

что совместно с (5) и (6) позволяет полностью определить спектральную плотность волновой заданной интенсивности для двумерного волнения.

Таблица 1 – Шкала степени морского волнения

Степень волнения	Высота волны, $h_{3\%}, м$	Характеристика волнения
1	0...0,25	Слабое
2	0,25...0,75	
3	0,75...1,25	Значительное
4	1,25...2,0	
5	2,0...3,5	Сильное
6	3,5...6,0	

Наиболее точным по существующим представлениям является описание морского волнения суперпозицией волновых систем [6, 8]. Энергетические спектры двумерного и трехмерного волнений связаны соотношением:

$$\int_0^{\infty} S_r(w)dw = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S_r(w, \alpha) d\alpha dw, \quad (8)$$

где α - угол распространения плоской системы волн относительно генерального направления.

Для описания энергетического спектра трехмерного волнения обычно используется формула Артура [8]:

$$S_r(w, \alpha) = \frac{2}{\pi} S_r(w) \cos^2(w), \quad (9)$$

где $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$; $S_r(w)$ – спектр двумерного волнения типа (6) или (7).

Подстановка (8) в (7) с учетом (5) позволяет записать выражение спектральной плотности трехмерного морского волнения, действующего на плавучее основание, расположенное под углом χ к генеральному направлению бега волн в форме:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_r(w) \cos^2(\alpha) \sin^2(\chi - \alpha) d\alpha, \quad (10)$$

где $(\chi - \alpha)$ – угол между осью плавучего основания и направлением распространения соответствующей плоской системы волн.

Интегрирование в правой части (10) приводит к результату:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \left(\frac{3}{4} \sin^2 \chi + \frac{1}{4} \cos^2 \chi \right) S_r(w), \quad (11)$$

где, как и ранее $S_r(w)$ – спектральная плотность двумерного морского волнения с описанием вида (5) или (6).

С учетом (11) спектральная плотность трехмерного морского волнения приобретает форму:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{1 + 2 \sin^2 \chi}{4} \frac{D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}. \quad (12)$$

Спектральной плотности типа (7) соответствует формирующий фильтр, изображение по Лапласу которого записывается как:

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{\sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2}, \quad (13)$$

возбуждаемый сигналом типа белого шума.

Углы волнового склона для волн относительно малой амплитуды, к которым относится развитое морское волнение, могут быть определены выражением:

$$\varepsilon = \frac{w^2}{g} r, \quad (14)$$

где r – радиус волны, $r = h/2$.

С учетом (14) формирующий фильтр угла волнового склона приобретает форму:

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{-S^2 \sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g(S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2)}. \quad (15)$$

При построении формирующих фильтров (11) и (15) для трехмерного морского волнения использован подход, предложенный А.В. Герасимовым [6] для определения дисперсии бортовой качки плавучего основания, расположенного лагом к волне, при воздействии двумерного и трехмерного волнений.

В терминах пространства состояния [14] формирующий фильтр угла волнового склона двумерного морского волнения, воздействующего на плавучее основание, может быть получен на основании (15):

$$\dot{X}_\phi = A_\phi X_\phi + B_\phi V; \quad (16)$$

$$\varepsilon_x = C_\phi X_\phi + D_\phi V, \quad (17)$$

где $A_\phi = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(\alpha^2 + \beta^2) & -2\alpha \end{pmatrix},$

$$X_\phi = \begin{pmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{pmatrix}; \quad B_\phi = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ \beta^2 - 3\alpha^2 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{(1 + 2\sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}};$$

$$C_\phi = (1 \ 0); \quad D_\phi = \frac{\sqrt{(1 + 2\sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}},$$

где V – белый шум;

ε_χ – эквивалентный угол волнового склона для двумерного морского волнения;

$$\alpha = 0,21\beta, \beta = 1,427h_{3\%},$$

χ – угол между диаметральной плоскостью плавучего основания и генеральным направлением распространения бега волн;

g – ускорение силы тяжести;

D_r – дисперсия волновой ординаты;

$h_{3\%}$ – высота волны 3% обеспеченности.

В соответствии с [12] соотношение (16) представляет «сообщение», а выражение (17) – «наблюдение» над динамическим объектом – взволнованной жидкостью.

Согласно гидродинамической теории качки судна на волнении, силы, воздействующие на плавучее основание, определяются зависимостями [7, 8]:

$$F_{\tilde{x}} = -\mathfrak{A}_\xi V \rho g k r(t); \quad F_{\tilde{y}} = -\mathfrak{A}_\zeta V \rho g k r(t); \quad F_{\tilde{z}} = -\mathfrak{A}_\varsigma S g r(t);$$

$$M_{\tilde{x}} = \mathfrak{A}_\theta V h \rho g k r(t); \quad M_{\tilde{y}} = \mathfrak{A}_\psi V H \rho g k r(t); \quad M_{\tilde{z}} = \mathfrak{A}_\phi V L \rho g k r(t), \quad (18)$$

где $\mathfrak{A}_\xi, \mathfrak{A}_\zeta, \mathfrak{A}_\varsigma, \mathfrak{A}_\theta, \mathfrak{A}_\psi, \mathfrak{A}_\phi$ – редукционные коэффициенты поперечно-горизонтальной, продольно-горизонтальной, вертикальной, бортовой, килевой качки и рыскания соответственно;

V – водоизмещение судна;

ρ – удельная плотность воды;

g – ускорение силы тяжести;

k – волновое число, $k \cong w^2/g$;

S – площадь ватерлинии;

h, H – малый и большой метацентрический радиусы судна;

w – круговая частота волнения;

$r(t)$ – ордината волнового профиля;

t – время.

Согласно тем же источникам продольно-горизонтальные силы $F_{\bar{x}}$ и соответствующие им смещения, вызываемые морским волнением, для достаточно удлиненных судов малы и обычно не учитываются. При определении главной части возмущающих сил корпуса таких судов могут быть представлены профилем крыла малого удлинения. Численный анализ показывает, что даже при волнении высотой 6 м (6 баллов), продольные смещения судов не превышают единиц сантиметров. Достаточно удлиненными считаются суда с отношением длины к ширине корпуса больше четырех. Плавающие мастерские относятся именно к таким типам вследствие большой длины плавучего основания.

Редукционные коэффициенты могут быть определены либо путем испытания масштабных моделей, либо путем интегрирования расчетных полей давления во взволнованной жидкости.

Переобозначим $\dot{G}_1 = X_\phi$; $y_1 = \varepsilon_x = W$. При введении формирующего фильтра (16), (17) динамическая система приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 W + C_0 U; \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1; \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2; \\ z = Dz + Ev, \end{cases} \quad (19)$$

откуда непосредственно следует:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 D_1 G_1 + B_0 E_2 v_2 + C_0 U; \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \end{cases} \quad (20)$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса шлифования с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками заготовки как состояния расширенного объекта в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 D_1 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_0 \\ G_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 E_2 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ w_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 \\ 0 \end{bmatrix} \times U. \quad (21)$$

Векторно-матричные уравнения (21) являются стандартной формой описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволило ее использовать для анализа процесса и синтеза систем управления. Примеры численных характеристик работы фильтра представлены на рисунках 2 и 3.

Анализ указанных характеристик показывает, что через промежуток времени 0,4с наблюдатель переходит в установившийся режим с готовностью к практическому использованию.

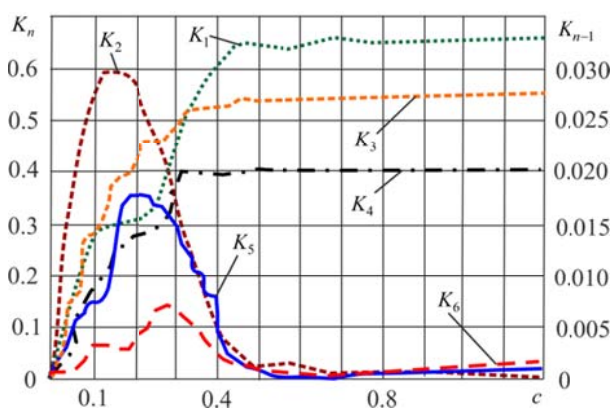


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов усиления фильтра от времени

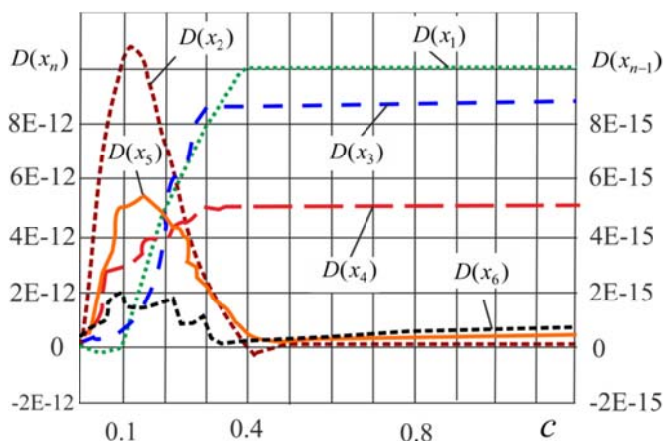


Рисунок 3 – Зависимость дисперсии оценок от времени

Заключение.

Такой подход позволил к разработанной ранее модели динамической системы шлифовального станка [1,2] построить формирующий фильтр – динамическое звено, синтезирующее динамику вибрационных воздействий на станок от внешней среды через основание плавучей мастерской. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований влияния на качество деталей при шлифовальной обработке морского волнения, воздействующего на плавучее основание мастерской, определения целесообразности использования новых виброизолирующих систем и устройств станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88-103.
2. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
3. Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
4. Волосенко Е.Б. К вопросу воздействия ветровой нагрузки на судно / Е.Б. Волосенко // Мореходность и управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1988. – Вып.105. – С. 53-60.
5. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А.Д. Гофман. – Л.: Судостроение, 1991. – 236 с.
6. Луговский В.В. Динамика моря / В.В. Луговский. – Л.: Судостроение, 1996. – 200 с.
7. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Динамика (качка) корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодильник. – Л.: Судостроение, 1995. – 176 с.
8. Бородай И.К. Качка судов на морском волнении / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. — Л.: Судостроение, 1969. – 284 с.
9. Расщепляев Ю.С. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления / Ю.С. Расщепляев, В.Н. Фандиенко. – М.: Энергия, 1991. – 145 с.
10. Смирнов Е.Б. Формирующие фильтры для случайных процессов. В кн. Современная теория автоматического управления / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1970. – С.159-194.
11. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные (Регистр СССР). – Л.: Транспорт, 1984. – 264 с.
12. Брамлер К. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация / К. Брамлер, Г. Зифлинг. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
13. Sergey Bratan, Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko / MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017).
14. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография/ С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.

Братан Сергей Михайлович
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 54-05-57
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Владецкая Екатерина Александровна
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел. 54-05-57
E-mail: vladetska@rambler.ru

Харченко Александр Олегович
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 54-05-57
E-mail: khao@list.ru

MODELING OF THE PROCESS OF FINISHING WITH THE ACCOUNT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS ON THE TECHNOLOGICAL SYSTEM THROUGH THE BASIS OF A FLOATING WORKSHOP

Abstract. *The article considers the results of theoretical studies of the grinding processing process taking into account the environmental factors affecting the technological system of the machine, causing disturbing vibrational effects through the base of the floating workshop. The effect of sea waves on the floating base is manifested in the form of horizontal-longitudinal oscillations, horizontal-lateral vibrations, vertical displacements, airborne and pitching, and yawing. Vector-matrix equations are the standard form of describing a dynamical system in terms of the theory of state space, which allowed it to be used to analyze the process and synthesize control systems. This approach allowed the previously developed model of the dynamic system of the grinding machine to build a forming filter, a dynamic link that synthesizes the dynamics of vibrational influences on the machine from the external environment through the base of a floating workshop.*

Keywords: *floating workshop, grinding machine, finishing, dynamic system, forming filter.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vladeckaja E.A. Obespechenie kachestva shlifovalnoj obrabotki putem umensheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii.— Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314).— S.88-103.
2. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego filtra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchej remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. — Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. — Sevastopol: Vid-vo SevNTU, 2014. — S. 36-40.
3. Harchenko A.O. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoj vibroizolyacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya //International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON08». — Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesień, 2008. — P. 47-58.
4. Volosenko Ye.B. K voprosu vozdeystviya vetrovoy nagruzki na sudno / Ye.B. Volosenko // Morekhodnost i upravlyayemost sudov. — L.: Sudostroyeniye, 1988. — Vyp.105. — S. 53-60.
5. Gofman A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya / A.D. Gofman. — L.: Sudostroyeniye, 1991. — 236 s.
6. Lugovskiy V.V. Dinamika morya / V.V. Lugovskiy. — L.: Sudostroyeniye, 1996. — 200 s.
7. Blagoveshchenskiy S.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. Dinamika (kachka) korablya / S.N. Blagoveshchenskiy, A.N. Kholodilin. — L.: Sudostroyeniye, 1995. — 176 s.
8. Boroday I.K. Kachka sudov na morskoy volnenii / I.K. Boroday, YU.A. Netsvetayev. — L.: Sudostroyeniye, 1969. — 284 s.
9. Rasshcheplyayev YU.S. Sintez modeley sluchaynykh protsessov dlya issledovaniya avtomaticheskikh sistem upravleniya / YU.S. Rasshcheplyayev, V.N. Fandiyenko. — M.: Energiya, 1991. — 145 s.
10. Stir Ye.B. Formiruyushchiye filtry dlya sluchaynykh protsessov. V kn. Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. K.T. Leondes. — M.: Mir, 1970. — S.159-194.
11. Veter i volny v okeanakh i moryakh. Spravochnyye dannyye (Registr SSSR). — L.: Transport, 1984. — 264 s.
12. Bramler K. Filtr Kalmana-Byusi. Determinirovannyye nablyudeniya i stokhasticheskaya filtratsiya / K. Bramler, G. Zifling. — M.: Nauka, 1982.— 200 s.
13. Sergey Bratan,Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko / MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017).
14. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya/ S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. — M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. — 154 s.

Bratan Sergey Mikhaylovich
"Sevastopol State University",
Sevastopol
Doctor of Engineering, professor,
head of the department
"Technology of mechanical
engineering"
299053, Sevastopol,
Universitetskaya St., 33
Тел. 54-05-57
E-mail: serg.bratana@gmail.com

Vladetskaya Ekaterina Aleksandrovna
"Sevastopol State University", Sevastopol
Ph.D., assistant professor of the
department "Technology of mechanical
engineering"
299053, Sevastopol,
Universitetskaya St., 33
Тел. 54-05-57
E-mail: vladetska@rambler.ru

Kharchenko Alexander Olegovich
"Sevastopol State University",
Sevastopol
Ph.D., professor of the department
"Technology of mechanical
engineering"
299053, Sevastopol, Universitetskaya
St., 33
Тел. 54-05-57
E-mail: khao@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРПУАНСОНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАКАНОВ С ФЛАНЦЕМ В ДОННОЙ ЧАСТИ

Аннотация. В статье представлена наиболее общая расчётная схема для механико-математического анализа процесса прямого выдавливания с использованием контрпуансона для изготовления стаканов с фланцем в донной части. Получена общая формула для определения силы деформирования. Результаты исследования могут быть использованы для определения необходимой силы пресса, расчёта матрицы на прочность по максимальному, действующему на неё, давлению, а также для выбора материалов требуемой прочности для изготовления инструмента.

Ключевые слова: прямое выдавливание, контрпуансон, стакан с фланцем.

Введение

В машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оружейной промышленности широко используются изделия типа стаканов с фланцем в донной части. Например, они применяются для производства фланцевых пистолетных патронов с капсюльными втулками, гильз и капсюлей сигнальных патронов. Также служат функциональными или декоративными заглушками автомобилей и бытовой техники. Подобные изделия используют в качестве крышек подшипниковых маслёнок, различных подпятников и опор.

В настоящее время остро стоит задача снижения энергетических затрат и расхода металла, а также повышения производительности и качества при производстве подобных изделий, которая может быть решена путём применения прямого выдавливания с использованием контрпуансона.

Анализ вопроса показал, что ни детальное экспериментальное, ни достаточно строгое теоретическое изучение такого выдавливания в известных работах по выдавливанию ранее не проводилось. Поэтому актуальным является исследование данного процесса с целью создания научно обоснованной методики его успешного проектирования.

Исследовательская часть

Целью исследования являлось создание расчетной схемы процесса прямого выдавливания с использованием контрпуансона и получение формулы для определения необходимой силы деформирования.

Расчётная схема для механико-математического анализа процесса представлена на рисунке 1. В этой схеме используется цилиндрическая система координат ρ , θ , z , а очаг пластической деформации представлен в виде четырёх областей: области 1, в которую поступает металл из областей 2 и 5, примыкающей к матрице области 2, области 3, в которую поступает металл из областей 4 и 5, примыкающей к контрпуансону области 4. Выше пластических областей 1–4 расположена жёсткая область 5, а ниже – жёсткие области 6 и 7, образующие выдавливаемую стенку стакана.

Если рабочий торец контрпуансона отличается от плоского и выполнен, например, в виде усечённого конуса или скруглён радиусной фаской (показано точечными линиями справа от оси симметрии), то такие случаи можно свести к рассматриваемой кинематически возможной схеме путём предположения образования на торце профилированного контрпуансона застойных зон, дополняющих его форму до плоской. Таким образом, разработанная расчётная схема даёт верхнюю оценку силовых параметров и для всех форм рабочего торца контрпуансона, отличных от плоской. То есть данная схема является наиболее общей.

Неизвестный пока радиус R_r определяет положение вертикальной границы, на всём протяжении которой радиальная скорость $v_r=0$. То есть на данной границе отсутствует обмен металла между областями 1 и 3.

Неизвестные пока высоты пластических областей h_1 и h_2 должны быть найдены в результате механико-математического анализа.

Положение рабочего торца контрпуансона характеризуется высотой H_2 . Укажем, что в зависимости от конкретных размеров получаемого изделия высота H_2 может быть меньше или больше высоты H_1 , или может быть равной H_1+h_0 . На корректности разработанной расчётной схемы это не отразится.

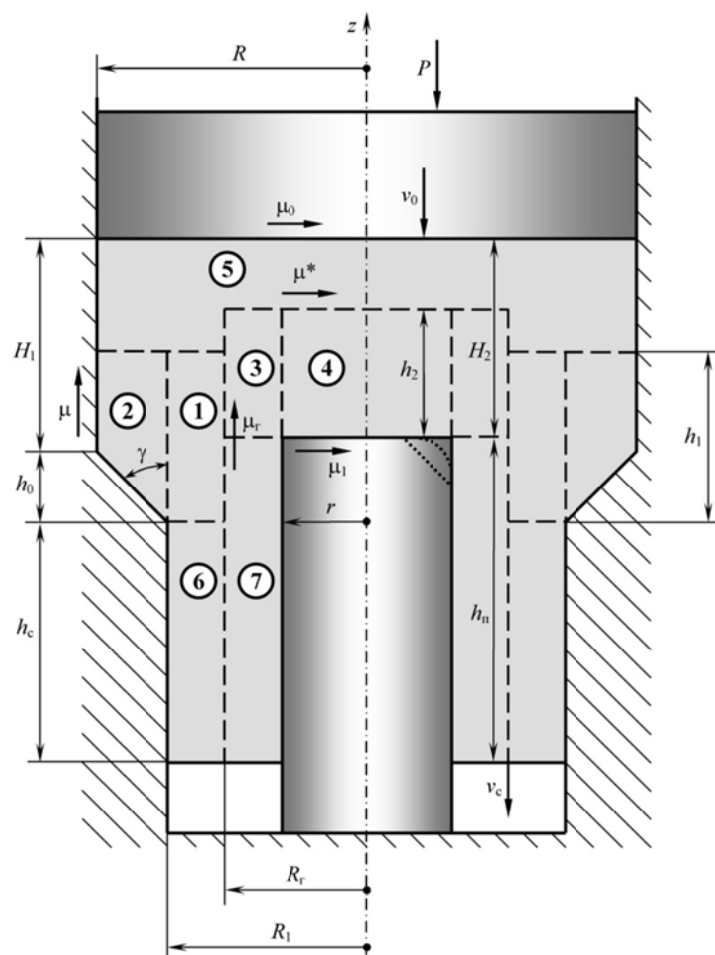


Рисунок 1 - Расчётная схема прямого выдавливания с использованием контрпунсона

Теоретическое определение кинематического, напряжённого и деформированного состояний заготовки выполняем по методу пластического течения А.Л. Воронцова [1], который ориентирован на гарантированное получение верхней оценки и, соответственно, опирается на кинематически возможные скорости течения, что очень важно в связи с указанным в работе [3] несовершенством классической теории пластичности, занижающим оценку силовых параметров.

При рассмотрении осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат ρ , θ , z полная система уравнений теории пластичности включает в себя [4]: уравнения равновесия

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0; \end{array} \right. \quad (2)$$

систему уравнений Леви–Мизеса, связывающих напряжения и скорости деформаций

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_\rho = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_\rho, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_\theta = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_\theta, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_z, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\rho z} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \eta_{\rho z}; \end{array} \right. \quad (6)$$

интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_\rho - \xi_\theta)^2 + (\xi_\theta - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_\rho)^2} + \frac{3}{2} \eta_{\rho z}^2; \quad (7)$$

условие несжимаемости (условие постоянства объёма)

$$\xi_\rho + \xi_\theta + \xi_z = 0; \quad (8)$$

кинематические уравнения Коши, связывающие скорости деформации со скоростями течения

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_\rho &= \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho}, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_\theta &= \frac{v_\rho}{\rho}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z}, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{\rho z} &= \frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Таким образом, осесимметричная задача идеальной пластичности включает 12 уравнений, в которые входит 12 неизвестных величин: напряжения σ_ρ , σ_θ , σ_z , $\tau_{\rho z}$, среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление) σ , скорости деформаций ξ_ρ , ξ_θ , ξ_z , $\eta_{\rho z}$, интенсивность скоростей деформаций ξ_i , скорости перемещения материальных точек среды (скорости течения) v_ρ , v_z .

Под задачей идеальной пластичности понимается задача, в которой используется модель идеального жёсткопластического материала, т.е. материала, у которого отсутствует упрочнение.

Математический аппарат для решения задач теории пластического течения физических тел, обладающих свойствами деформационного упрочнения, является существенно более сложным. В этом случае к полной системе вышеприведённых 12 уравнений необходимо добавить ещё два уравнения [5]:

$$\frac{\partial e_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial e_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial e_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial e_i}{\partial z} = \xi_i, \quad (13)$$

$$\sigma_i = \Phi(e_i), \quad (14)$$

где e_i – накопленная деформация (степень деформации) в рассматриваемой точке тела,

$\Phi(e_i)$ – функция, описывающая зависимость напряжения текучести σ_s конкретного материала от накопленной деформации и считающаяся вполне определённой из опытов на простое растяжение или сжатие (по условию пластичности интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_s$ [6]).

В полную систему уравнений осесимметричной задачи не входят ни известное выражение для гидростатического давления

$$\sigma = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}, \quad (15)$$

ни условие пластичности Губера–Мизеса

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2} + 6\tau_{\rho z}^2 = \sigma_s, \quad (16)$$

поскольку в работе [6] доказано, что при использовании уравнений Леви–Мизеса (3)-(6) равенства (15) и (16) удовлетворяются автоматически.

Таким образом, полная система уравнений теории пластического течения упрочняющихся тел для осесимметричной задачи будет включать 14 уравнений, содержащих 14 неизвестных (дополнительными неизвестными являются e_i и σ_i).

Будет решена задача идеальной пластичности. Упрочнение учитывается средней по очагу пластической деформации величиной напряжения текучести σ_s . Далее для обобщения используются относительные величины напряжений, отнесённые к указанной величине σ_s . Силы контактного трения определяются по закону Зибеля как $\tau_k = \mu \beta \sigma_s$, где μ – коэффициент трения по напряжению текучести (который по теории пластичности не может быть больше 0,5), а β – коэффициент Лоде [7].

Объём представленного на рисунке 1 полуфабриката (или же окончательного изделия) определяется формулой

$$V = \pi R^2 H_1 + \frac{\pi h_0}{3} (R^2 + R_1^2 + R R_1) + \pi R_1^2 h_c - \pi r^2 h_n, \quad (17)$$

где h_c – высота образовавшейся в ходе выдавливания стенки,
 h_n – высота образовавшейся в ходе выдавливания полости.
 С другой стороны, объём исходной цилиндрической заготовки

$$V = \pi R^2 H_0, \quad (18)$$

где H_0 – высота исходной заготовки.
 Приравняв выражения (17) и (18), найдём, что

$$H_0 = H_1 + \frac{h_0}{3} \left[1 + \frac{R_1}{R} + \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 \right] + \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 h_c - \left(\frac{r}{R} \right)^2 h_n, \quad (19)$$

При этом рабочий ход пуансона

$$s = H_0 - H_1, \quad (20)$$

$$h_0 = (R - R_1) \operatorname{ctg} \gamma. \quad (21)$$

Из условия образования единой выдавленной стенки следует, что скорости на выходе через нижние границы областей 1 и 3, и, соответственно, жёстких областей 6 и 7 должны быть равны друг другу, то есть одинаковой величине v_c (рисунок 1). Для обеспечения этого радиус границы R_r должен быть определённым. Найдём этот радиус.

Из условия постоянства расхода для областей 1 и 2 можно написать уравнение

$$\pi (R^2 - R_r^2) v_0 = \pi (R_1^2 - R_r^2) v_c, \quad (22)$$

откуда

$$v_c = \frac{R^2 - R_r^2}{R_1^2 - R_r^2} v_0. \quad (23)$$

Из условия постоянства расхода для областей 3 и 4 можно написать уравнение

$$\pi R_r^2 v_0 = \pi (R_r^2 - r^2) v_c, \quad (24)$$

откуда

$$v_c = \frac{R_r^2}{R_r^2 - r^2} v_0. \quad (25)$$

Приравняв выражения (23) и (25), получим уравнение

$$\frac{R^2 - R_r^2}{R_1^2 - R_r^2} = \frac{R_r^2}{R_r^2 - r^2}, \quad (26)$$

из которого следует, что радиус границы

$$R_r = \frac{rR}{\sqrt{R^2 + r^2 - R_1^2}}. \quad (27)$$

В результате решения системы уравнений (1) – (12) для областей 1–4 были определены все вышеуказанные компоненты напряжённого состояния и получена общая формула для определения силы деформирования свободного выдавливания, которая имеет вид:

$$P = 3,456 \left\{ \sigma_{s1} R_1^2 \left\{ \left[1,5 \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{R}{R_1} \right)^2 \ln \frac{R}{R_1} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{(R^2 + R_1^2 - 2R_r^2) \cdot \left[0,5 - 0,25 \left(1 - \frac{R_1}{R} \right) \cos \gamma + \mu_r \frac{R_r}{R_1} \right]}{R_1^2 - R_r^2} - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right] \frac{h_1}{R_1} + \right. \right. \\ \left. \left. \left. \right\} \right\}$$

$$+ \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) \cdot \left[R^4 \left(\ln \frac{R}{R_1} - 0,75\right) + R^2 R_1^2 - 0,25 R_1^4\right]}{(R^2 - R_1^2) R_1 h_1} \Bigg\} +$$

$$+ \frac{2(\mu R_1 + \mu_r R_r) h_n}{R_1^2 - R_r^2} + 2 \left(\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{s1}} \right) \cdot \frac{\mu R (H_1 - h_1)}{R^2 - R_r^2} \Bigg\} + \sigma_{s2} r^2 \left[2 + \ln \frac{R_r}{r} + \frac{r + 2\mu_r R_r}{2(R_r^2 - r^2)} h_2 + \frac{0,5 + \mu_1}{4h_2} r \right], \quad (28)$$

где σ_{s0} – начальное напряжение текучести (предел текучести) материала заготовки;

σ_{s1} – среднее напряжение текучести материала заготовки в областях 1 и 2;

σ_{s2} – среднее напряжение текучести материала заготовки в областях 3 и 4.

Эти напряжения текучести определяются в зависимости от величин накопленной деформации по методике работ [1, 2].

Высота очага пластической деформации областей 1 и 2 определяется по формуле, найденной из условия минимума энергии пластической деформации:

$$h_1 = \sqrt{\frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) \cdot \left[R^4 \left(\ln \frac{R}{R_1} - 0,75\right) + R^2 R_1^2 - 0,25 R_1^4\right]}{(R^2 - R_1^2) \cdot \left\{ \frac{(R^2 + R_1^2 - 2R_r^2) \cdot \left[0,5 - 0,25 \left(1 - \frac{R_1}{R}\right) \cos \gamma + \mu_r \frac{R_r}{R_1}\right]}{R_1^2 - R_r^2} - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right\}}}. \quad (29)$$

При использовании формулы (29) следует учитывать, что физически высота h_1 не может быть меньше высоты h_0 , определяемой выражением (21). Если в результате расчёта окажется, что $h_1 < h_0$, то следует принимать $h = h_0$.

Высота очага пластической деформации областей 3 и 4 также определяется по формуле, найденной из условия минимума энергии пластической деформации:

$$h_2 = \sqrt{\frac{r(R_r^2 - r^2)(0,5 + \mu_1)}{2(r + 2\mu_r R_r)}}. \quad (30)$$

Если по мере увеличения рабочего хода высота H_1 окажется меньше высоты h_1 , а высота H_2 окажется меньше высоты h_2 , то это означает начало в соответствующих областях стеснённого выдавливания, для определения силы которого в формулу (28) вместо значений (29) и (30) следует подставлять текущие значения

$$h_1 = H_1, \quad (31)$$

$$h_2 = H_2. \quad (32)$$

Результаты исследований

Разработана наиболее общая расчётная схема для механико-математического анализа процесса прямого выдавливания с использованием контрпуансона. Она позволяет дать верхнюю оценку силовых параметров для всех форм рабочего торца контрпуансона, отличных от плоской.

Получена общая формула для определения силы деформирования при прямом выдавливании с использованием контрпуансона стаканов с фланцем в донной части.

Выводы

Полученная расчетная схема и формула для определения силы деформирования будут использованы для определения необходимой силы пресса, расчёта матрицы на прочность по максимальному, действующему на неё, давлению, а также для выбора материалов требуемой прочности для изготовления инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. Том 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 396 с.
2. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. Том 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 441 с.

3. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 3. Непарность касательных напряжений // Производство проката. 2010. № 5. С. 2-8.
4. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Напряжённое и кинематическое состояния при осадке цилиндрической заготовки с трением на торцах. Метод баланса работ. Часть 1 // Производство проката. 2010. № 9. С. 2-13.
5. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 9. Степень деформации и накопленная деформация. Деформированное состояние заготовки и учёт упрочнения при осадке и вдавливании в полупространство. Часть 1 // Производство проката. 2011. № 2. С. 41-48.
6. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 6. Особенности приложения теории пластичности к анализу операций обработки металлов давлением // Производство проката. 2010. № 8. С. 2-12.
7. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.

Никифоров Иван Андреевич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ассистент кафедры «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (915) 219-77-72
E-mail: nikiforov.i.a@bmstu.ru

I.A. NIKIFOROV

**RESEARCH OF DIRECT EXTRUSION WITH USE
OF THE COUNTERPUNCH FOR PRODUCTION OF CUPS
WITH THE BOTTOM FLANGE**

Abstract. *The article presents a general design scheme for the mechanical and mathematical analysis of the direct extrusion process with use of a counterpunch for the production of cups with a bottom flange. A general formula for determining the deformation force is obtained. The results of the research can be used to determine the necessary strength of the press, calculate the matrix for strength according to the maximum pressure acting on it, and also to select materials of the required strength for tool manufacture.*

Keywords: *direct extrusion, counterpunch, cup with flange.*

BIBLIOGRAPHY

1. Voroncov A. L. Teoriya i raschety processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Tom 1. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana. 2014. 396 s.
2. Voroncov A. L. Teoriya i raschety processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Tom 2. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana. 2014. 441 s.
3. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 3. Neparnost kasatelnyh napryazhenij // Proizvodstvo prokata. 2010. № 5. S. 2-8.
4. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 7. Osesimmetrichnaya zadacha teorii plastichnosti. Napryazhyonnoe i kinematicheskoe sostoyaniya pri osadke cilindricheskoj zagotovki s treniem na torcah. Metod balansa rabot. CHast 1 // Proizvodstvo prokata. 2010. № 9. S. 2-13.
5. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 9. Stepen deformacii i nakoplennaya deformaciya. Deformirovannoe sostoyanie zagotovki i uchyot uprochneniya pri osadke i vdavlivanii v poluprostranstvo. CHast 1 // Proizvodstvo prokata. 2011. № 2. S. 41-48.
6. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 6. Osobennosti prilozheniya teorii plastichnosti k analizu operacij obrabotki metallov davleniem // Proizvodstvo prokata. 2010. № 8. S. 2-12.
7. Storozhev M. V., Popov E. A. Teoriya obrabotki metallov davleniem. M.: Mashinostroenie. 1977. 423 s.

Nikiforov Ivan Andreevich

Bauman Moscow State Technical University
Assistant of Department «Technology of material working»
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
Tel.: +7 (915) 219-77-72
E-mail: nikiforov.i.a@bmstu.ru

Н.Н. ОЛЕЙНИЧЕНКО

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. *Выполнен обзор современных систем возбуждения и регулирования напряжения судовых синхронных генераторов (СГ). Определены основные способы повышения качества напряжения СГ. Приведено обоснование применения способа параметрической стабилизации напряжения СГ.*

Ключевые слова: *синхронный генератор, импульсное регулирование возбуждения, высшие гармоники напряжения.*

Введение

Опыт мирового судостроения и практика эксплуатации судовых электроэнергетических систем выявили основные направления развития электромеханики. Так, основными источниками питания на судах и в других автономных системах являются синхронные генераторы (СГ). Требования, связанные с качеством электроэнергии и надежностью, предъявляемые к судовым СГ, неуклонно ужесточаются. В применяющихся в настоящее время синхронных машинах необходимое совмещение разнообразных характеристик обеспечивается еще недостаточно. Совмещение качества и надежности в одной машине может быть достигнуто путем создания и внедрения новых типов синхронных генераторов или усовершенствования известных конструкций с применением новых способов обеспечения возбуждения, например, на базе импульсного регулирования [1, 2, 3]. Имеющиеся оригинальные разработки агрегатов генерирования и преобразования электроэнергии, систем автоматического управления и регулирования не позволяют вести систематическое проектирование указанных систем.

Для исследования СГ с системами импульсного регулирования необходимы специальные уравнения, описывающие процессы в системах возбуждения синхронных генераторов с учетом специфики протекающих в них физических процессов, а также создание и испытания установок с синхронными генераторами с импульсным возбуждением, начало исследования которых было начато еще в 60-х годах прошлого века [4], и в настоящее время остается актуальным.

Пути решения задачи

Для решения поставленной задачи выполнен анализ современного состояния техники в области судовых синхронных генераторов и определена возможность повышения эффективности систем возбуждения СГ путем применения импульсного регулирования возбуждения; разработано математическое описание кривой фазного напряжения генератора при заданном способе регулирования; разработан программный комплекс для моделирования судовых СГ с импульсной системой возбуждения по способу параметрической стабилизации; получены математические выражения для расчета коэффициента искажения формы напряжения судового СГ в зависимости от его параметров, нагрузки и коэффициента форсировки для оценки качества вырабатываемой электроэнергии при импульсном регулировании; проведены экспериментальные исследования синхронного генератора с параметрической стабилизацией напряжения.

В [5] предлагается способ импульсного регулирования напряжения судового бесщеточного СГ, названный авторами параметрической стабилизацией напряжения. Этот способ заключается в следующем: трехфазное напряжение СГ снимается трансформатором, выпрямляется трехфазной мостовой схемой, пульсации выпрямленного напряжения U_{Π} сравниваются с заданным опорным напряжением $U_{оп}$, измеряются временные интервалы, когда напряжение пульсаций ниже опорного, и в результате формируются импульсы напряжения U_f , подаваемые на обмотку возбуждения. Величина этих импульсов и их

длительность определяется режимом работы СГ; мгновенные пульсации выпрямленного напряжения генератора перед измерением временных интервалов сглаживаются (рисунок 1).

Для получения сглаженного сигнала после выпрямителя установлена интегрирующая цепь, имеющая передаточную функцию [6]

$$K(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{1}{1 + \tau_0 j\omega}, \quad (1)$$

где τ_0 – постоянная времени интегрирующей цепи ($\tau_0 = RC$),
 R, C – параметры элементов цепи.

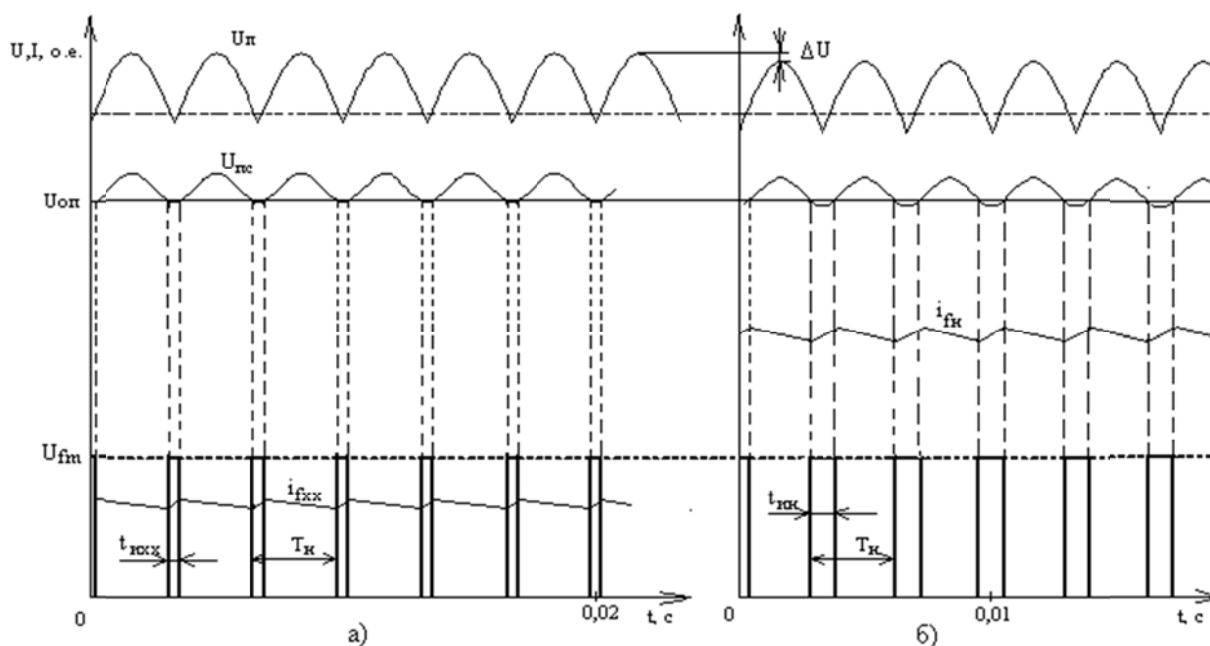


Рисунок 1 – Временные диаграммы параметрического стабилизатора напряжения:
 а) на холостом ходу; б) при нагрузке (U_{nc} – напряжение сглаженных пульсаций)

Модуль передаточной функции (1) определяется соотношением

$$|K(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}, \quad (2)$$

из которого следует, что при увеличении R или C модуль передаточной функции (коэффициент передачи) уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды пульсаций.

Для проведения экспериментальных исследований был создан стенд [7], структурная схема которого приведена на рисунке 2, где: GS – исследуемый синхронный генератор; M1 – приводной двигатель; M2 – вращающийся преобразователь; M3+G2 – нагрузка; UD1, UD2 – выпрямительные блоки; RC-фильтр – сглаживающая цепь; ИОН – источник опорного напряжения; ИНВ – источник начального возбуждения; KB – коммутатор возбуждения; КлВ – ключевой каскад возбуждения; К DA1, К DA2 – компараторы; ЭВМ – регистрирующий комплекс на базе ЭВМ.

Цель эксперимента заключалась в том, чтоб определить основные показатели качества напряжения исследуемого генератора при регулировании напряжения блоком автоматического управления, построенного по принципу параметрической стабилизации, описанному выше. Также необходимо было оценить влияние количества импульсов, подаваемых в обмотку возбуждения за период.

Результаты экспериментального исследования

Эксперимент был максимально приближен к реальным условиям работы судового генератора. В качестве нагрузки для генератора использовался асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Известно, что пуск такого двигателя сопровождается глубоким

провалом напряжения, поэтому в реальных условиях производится запуск двигателя мощностью, не превышающей 30 % номинальной мощности генератора.

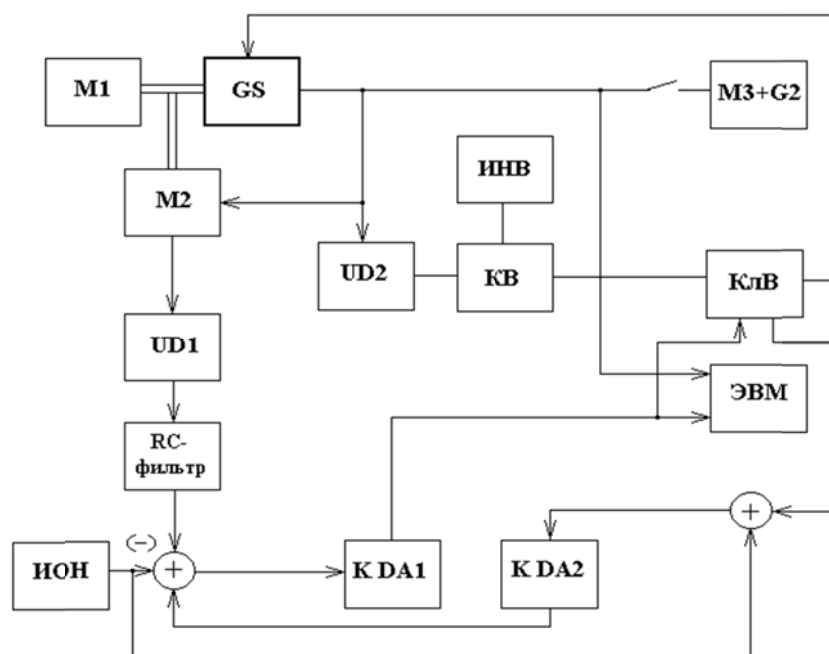


Рисунок 2 – Структурная схема установки:

При исследовании использовался двигатель соизмеримой мощности, то есть условия пуска были максимально жесткими. В качестве дополнительной нагрузки использовался набор нагревателей. Для получения результатов высокой достоверности каждый эксперимент выполнялся не менее 10 раз. Так же были завышены требования по времени восстановления напряжения: переходный процесс считался законченным при вхождении напряжения в зону 1% от установившегося. Кривые переходных процессов записывались с помощью ЭВМ. Расчет коэффициента несинусоидальности и других показателей качества напряжения производился по методике, приведенной в ГОСТ Р ИСО 8528-3–2005. В таблицу результатов исследования вошли средние показатели (таблицы 1 – 3).

Заключение

Показано, что форма напряжения судового СГ зависит от способа возбуждения генератора (непрерывное или импульсное). На основе расчетов и экспериментальных исследований доказано, что существенного отрицательного влияния на качество напряжения СГ, как было принято раньше считать, импульсное возбуждение по способу ПСН не оказывает. Значение коэффициента несинусоидальности достаточно низкое и находится в пределах нормы, определенной Правилами Морского Регистра России (7%).

Таблица 1 – Параметры переходного процесса в СГ при включении различных типов нагрузки (число импульсов возбуждения за период $n=6$)

Показатель	Значение
Провал напряжения при пуске ненагруженного АД на пике кривой	20 %
Время переходного процесса (вхождение в зону 1%)	0,23 с
Провал напряжения при пуске ненагруженного АД вне пика кривой	< 10 %
Время переходного процесса (вхождение в зону 1%)	0,195 с
Провал напряжения при пуске нагруженного АД на пике кривой	22 %
Время переходного процесса (вхождение в зону 1%)	0,2 с
Статическая ошибка по отклонению выходного напряжения от номинального значения при работе на нагрузку	0,5 – 1,0 %

Таблица 2 – Значения коэффициента несинусоидальности в установившемся режиме при различных типах нагрузки

Тип нагрузки	Амплитуда гармоник, В					K _U , %
	U ₁	U ₃	U ₅	U ₇	U ₉	
Холостой ход	210,29	5,38	2,10	3,33	-	3,13
Асинхронный двигатель ненагруженный	211,87	5,36	0,54	0,68	-	2,54
Асинхронный двигатель при номинальной нагрузке	211,87	5,32	1,34	1,07	0,84	2,69
Асинхронный двигатель при номинальной нагрузке + активная нагрузка (нагреватель)	211,87	5,32	1,19	2,12	1,68	2,87
Активная нагрузка	211,87	3,36	1,34	-	-	1,71

Таблица 3 – Параметры напряжения БСГ с ПСН при различных типах нагрузки (при n=12)

Показатель	Значение
Провал напряжения при пуске ненагруженного АД на пике кривой	20 %
Провал напряжения при пуске ненагруженного АД вне пика кривой	< 10 %
Время переходного процесса (вхождение в зону 1%)	0,195 с
Провал напряжения при пуске нагруженного АД на пике кривой	23 %
Статическая ошибка по отклонению выходного напряжения от номинального значения при работе на нагрузку	0,4 – 0,6 %
Коэффициент несинусоидальности напряжения при холостом ходе	2,62 %
Коэффициент несинусоидальности напряжения при работе на нагруженный АД	2,65 %

Установлено, что провал напряжения СГ с ПСН при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью Р, равной номинальной мощности генератора Р_н, составляет 20 – 22 %, что находится в пределах требований Регистра, предъявляемых к судовым синхронным генераторам. Время восстановления напряжения (переходного процесса) колеблется в пределах от 0,005 с до 0,22 с в зависимости от момента включения. Эти показатели лучше, чем у систем с амплитудно-фазовым компаундированием и некоторых других систем регулирования напряжения бесщеточных генераторов, у которых время восстановления напряжения составляет порядка 0,4 – 0,8 с.

Также установлено, что увеличение числа импульсов, подаваемых на обмотку возбуждения, не оказывает существенного влияния на динамические показатели (провал напряжения и время переходного процесса), так как параметры системы возбуждения не влияют на переходный процесс, однако при этом повышается устойчивость работы генератора и снижается коэффициент несинусоидальности напряжения в среднем на 0,05%.

Таким образом, система автоматического регулирования напряжения, работающая по принципу параметрической стабилизации, которая относится к системам импульсного регулирования, обеспечивает стабильную работу генератора в автономной системе и высокие показатели качества напряжения, которое вырабатывает генератор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конопльов К.Г. Про якість електроенергії в корабельній електроенергетиці/ К.Г. Конопльов// Морська держава. – 2004. – №3. – С.60– 63.
2. Коноплев К.Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронного генератора в автономных электрических системах. / К.Г. Коноплев // Техническая электродинамика. – 2006. – №1. – С. 68 – 71.

3. Алаев В.В. Распределение реактивной мощности в судовой электроэнергетической системе при импульсном регулировании возбуждения синхронных генераторов: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Защ. 24.01.04; Утв. 12.05.04; 12-08/5. – Севастополь, 2004. – 168 с.: ил. – Библиогр.: с.153-158.
4. Петров Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин / Ю.П. Петров // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 45 – 48.
5. Пат.64442А Україна, МПК⁷H03L5/00. Спосіб параметричної стабілізації напруги синхронного генератора/ О.М. Олейніков, О.М.Шоцький (Україна).- №2003065055
6. Чепендюк Н.Н. Математическая модель бесщеточного синхронного генератора с параметрической стабилизацией напряжения / Н.Н. Чепендюк // Оптимизация производственных процессов. Вып.9: сб.науч.тр. – Севастополь: СевНТУ, 2006. – С.65–71.
7. Олейниченко Н.Н. Анализ качества напряжения судового бесщеточного синхронного генератора при импульсном регулировании/ Н.Н. Олейниченко // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Материалы междунар. науч-техн. конф, Севастополь, 19-21 сент.2009 г. – Севастополь, 2009. – С.156 – 157.

Олейниченко Наталья Николаевна

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры Судового электрооборудования
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. (8692) 435-272
E-mail: NNOleinichenko@sevsu.ru

N.N. OLEYNICHENKO

THE APPLICATION OF PULSE CONTROL SYSTEMS FOR IMPROVING THE VOLTAGE QUALITY OF SHIP SYNCHRONOUS GENERATORS

Abstract. *The review of modern systems of excitation and voltage regulation of ship synchronous generators (SG). The main ways to improve the quality of SG voltage are determined. The substantiation of application of the method of parametric stabilizing of the voltage of the SG.*

Keywords: *synchronous generator, a pulse control of excitation, higher harmonics of the voltage.*

BIBLIOGRAPHY

1. Konoplev K.G. Pro yakist elektroenergii v korabelnoy elektroenergetyци/ K.G. Konoplev // Morska dergava. – 2004. – №3. –S.60– 63.
2. Konoplev K.G. Izmenenie faznogo napryageniya pri impulsnom regulirovanii sinhronnogo generatora v avtonomnyh elektricheskikh sistemah / K.G. Konoplev // Tehnicheskaya elektrodinamika. – 2006. – №1. – S. 68 – 71.
3. Alaev V.V. Raspredelenie reaktivnoy moschnosti v sudovoy elektroenergeticheskoy sisteme pri impulsnom regulirovanii vozbuzhdeniya sinhronnyh generatorov: Diss. ... kand. tehn. Nauk 05.09.03.–Zasch. 24.01.04; Utv. 12.05.04; 12-08/5. – Sevastopol, 2004. – 168 s.: il. – Bibliogr.: c.153-158.
4. Petrov U.P. Ispolzovanie «principa maksimuma» dlya nahozhdeniya optimalnogo zakona rgulirovaniya sinhronnyh mashin / U.P. Petrov // Elektrichestvo. – 1964. – № 10. – S. 45 – 48.
5. Patent 64442A Ukraine, МПК⁷H03L5/00. Method of parametric stabilization of synchronous generator voltage / A.M. Oleynikov, A.N. Shockiy (Ukraine). – №2003065055.
6. Chependuk N.N. Matematicheskaya model beschetochного sinhronnogo generator s parametricheskoy stabilizaciey napryazheniy / N.N. Chependuk // Optimizaciya proizvodstvennyh processov. Vyp.9: sb.nauch.tr. – Sevastopol: SevNTU, 2006. – S.65–71.
7. Oleynichenko N.N. Analiz kachestva napryazheniya sudovogo besschetochного sinhronnogo generetora pri imulsnom regulirovanii/ N.N. Oleynichenko // Problemy povysheniya effektivnosti elektromehaniicheskikh preobrazovateley v elektroenergeticheskikh sistemah: Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., Sevastopol, 19-21 sent. 2009 g. – Sevastopol, 2009. – S.156 – 157.

Oleynichenko Natalya Nikolaevna

FSAEI «Sevastopol State University», Sevastopol
PhD, assistant professor of marine electrical equipment, 299053, Sevastopol, Universitetskaya,33
Tel. +7(865) 435-272
E-mail: NNOleinichenko@sevsu.ru

В.М. ЛИПКА, С.М. БРАТАН, Ю.Л. РАПАЦКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОЦЕССА НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНЫХ РЕЗЬБ С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ОТКАЗОВ

Аннотация. Рассмотрено влияние различных факторов, вызывающих взаимосвязанные отказы в процессе накатывания наружных резьб М6...М20 на двухроликовых резьбонакатных станках. Предложена математическая модель, позволяющая количественно оценить влияние взаимосвязанных отказов на надежность процесса накатывания наружной резьбы.

Ключевые слова: резьбовые детали с наружной резьбой, взаимосвязанные отказы в процессе резьбонакатывания.

Введение

В современном машиностроении, в т.ч. в двигателестроении, а также в судостроении, авиастроении и других отраслях наиболее массовыми являются резьбовые соединения (РС) М6...М20 с мелким и нормальным шагом (1,0...2,0 мм). Ограничимся в статье рассмотрением технологического процесса получения наружных резьб (НР) на болтах и шпильках. Технологические проблемы, связанные с обеспечением качества внутренних резьб, заслуживают отдельного подробного рассмотрения. Одним из наиболее эффективных способов получения крепежных резьбовых деталей (РД) с НР является резьбонакатывание на двухроликовых станках с радиальной подачей. [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8]. Вместе с тем, как показали многочисленные эксперименты [2, 3, 4, 6, 7], обеспечение стабильного качества РД с НР при высокой производительности и минимальных материальных затратах является сложной задачей, которая в полной мере не решена.

Особое значение для надежности ИМ имеет недопущение релаксации высоконагруженных РС и раскрытия стыка между соединяемыми деталями [4,7,9]. Ввиду нестабильности качества РД и невозможности применения сплошного контроля параметров резьбы и селективной сборки РС в условиях современного производства, величины зазоров между сопрягаемыми резьбовыми поверхностями при свинчивании и затяжке являются случайными величинами, значения которых во многих случаях по технологическим и организационным причинам не соответствуют расчетным посадкам [3,7]. В ряде публикаций предложены математические модели надежности процесса резьбонакатывания, но все они построены в предположении независимости всех возникающих отказов, что существенно снижает точность результатов и затрудняет их практическое применение. [9]

Основная часть.

Как показали экспериментальные исследования [3,4,5], наибольшее влияние на качество РД с НР оказывает процесс резьбонакатывания, а также наследственная информация [7], передаваемая заготовкам при технологическом наследовании в ходе последовательного выполнения всех этапов процесса изготовления, среди которых особое значение имеет операция шлифования. Одним из важнейших факторов, определяющих качество деталей с НР, является состояние рабочей поверхности резьбонакатных роликов (РР). Все дефекты и отклонения формы и размеров рабочей поверхности РР, неизбежно воспроизводятся при накатывании резьбы на заготовках РД с НР. Отклонения от расчетных технологических параметров, в частности, недопустимое увеличение диаметра и твердости заготовок, как правило, вызывает катастрофический износ РР, который при нормальных условиях эксплуатации не возникает. На рисунке 1 показаны РР с выраженными следами ускоренного износа и повреждениями рабочей поверхности, которые в ходе экспериментов приводили к накатыванию дефектных РД. Анализ результатов производственных экспериментов показал, что расчетная стойкость РР, определяемая по формуле (1), далеко не всегда может быть достигнута в реальных условиях эксплуатации [2,4,6,9,10, 11].



Рисунок 1 – Резьбонакатные ролики со следами повреждений и разрушений рабочих поверхностей в процессе эксплуатации

Теоретическое значение стойкости T_P (тыс. заготовок) роликов для двухроликовых станков, работающих с радиальной подачей, можно определить по формуле [6,8]

$$T_P = T_T K_M K_C K_\Phi K_T K_D, \quad (1)$$

где T_T – базовая стойкость инструмента;

K_M – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от предела прочности и твердости материала заготовки;

K_C – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от марки инструментальной стали;

K_Φ – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от способа формообразования резьбового профиля на нём;

K_T – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от размера обрабатываемой резьбы;

K_D – коэффициент, учитывающий влияние диаметра РР на его стойкость.



Рисунок 2 – Типичные примеры различных видов брака наружной резьбы, вызванных взаимосвязанными отказами в процессе резьбонакатывания

Некоторые характерные примеры различных видов брака РД с НР, вызванных взаимосвязанными отказами в процессе резьбонакатывания, показаны на рисунке 2, слева направо: неполная высота профиля резьбы; смятие вершин резьбы; не выдержана длина резьбы, совместно с выкрашиванием ниток резьбы в месте совпадения с фаской заготовки; не выдержана длина резьбы, отклонение диаметра резьбы, совместно с выкрашиванием ниток резьбы в месте совпадения с фаской заготовки; отслаивание (шелушение) металла; неравномерная высота профиля по длине и окружности; не выдержана длина резьбы с полным профилем; конусность, совместно с овальностью резьбы; разброс диаметров резьбы (при одной наладке); трещины на резьбе.

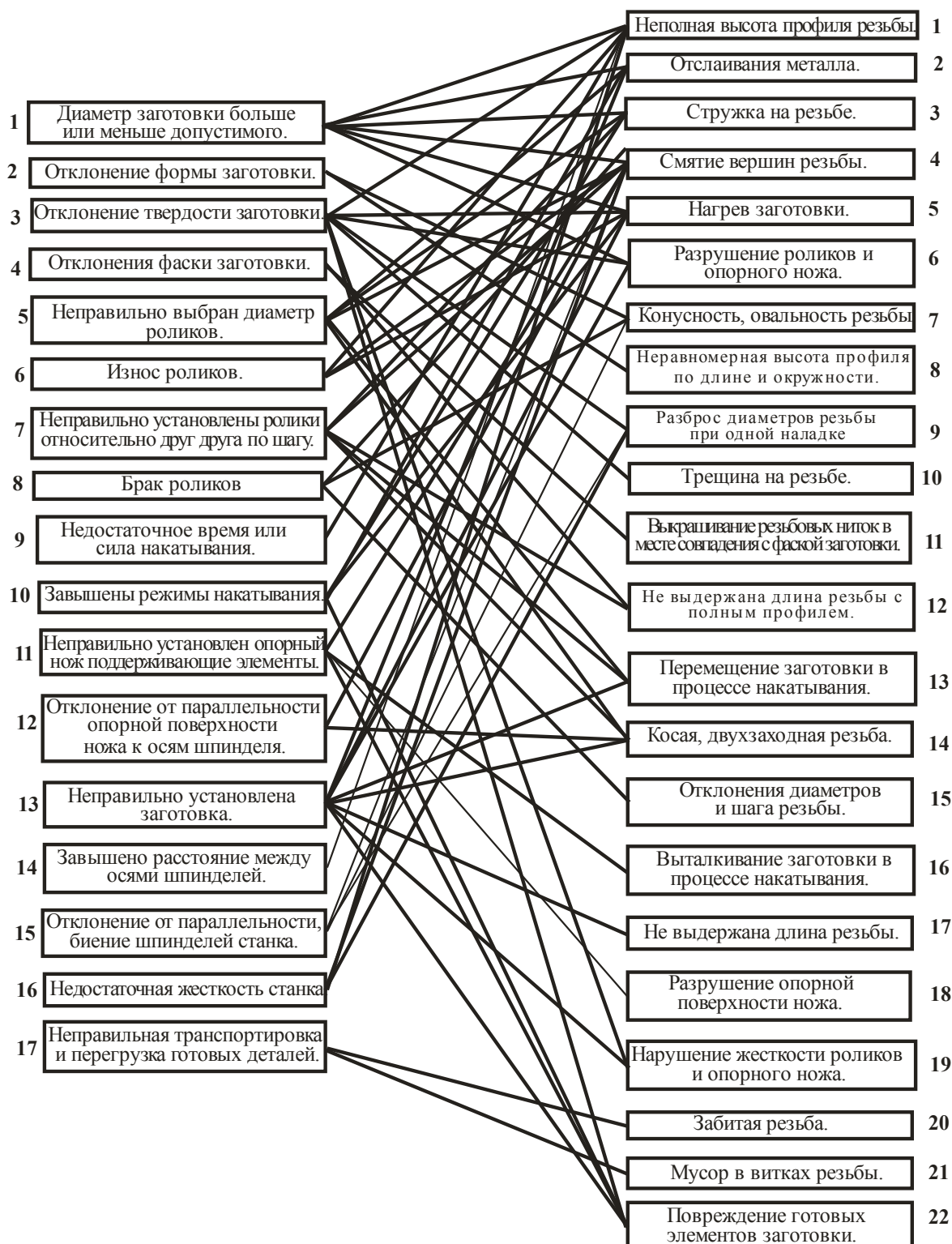


Рисунок 3 – Анализ результатов производственных экспериментов по выявлению причин возникновения взаимосвязанных отказов в процессе накатывания наружной резьбы на двухроlikовом резьбонакатном станке с радиальной подачей

Кроме того, к характерным видам брака РД с накатанной резьбой следует отнести закаты, складки, наслоения металла, появление стружки и некоторые другие.[6,8,10] Как видно из рисунка 2, отказы процесса резьбонакатывания, приводящие к выпуску РД с НР, непригодных для сборки РС, могут проявляться не только по отдельности, но и в различных сочетаниях. В ходе производственных экспериментов [4,9,11] проводились наблюдения за работой резьбонакатных станков, осуществлялась фото - и видеофиксация, визуальная оценка и измерения геометрических и точностных параметров РР и РД с НР, что позволило достоверно установить взаимосвязи между причинами отказов и их последствиями.

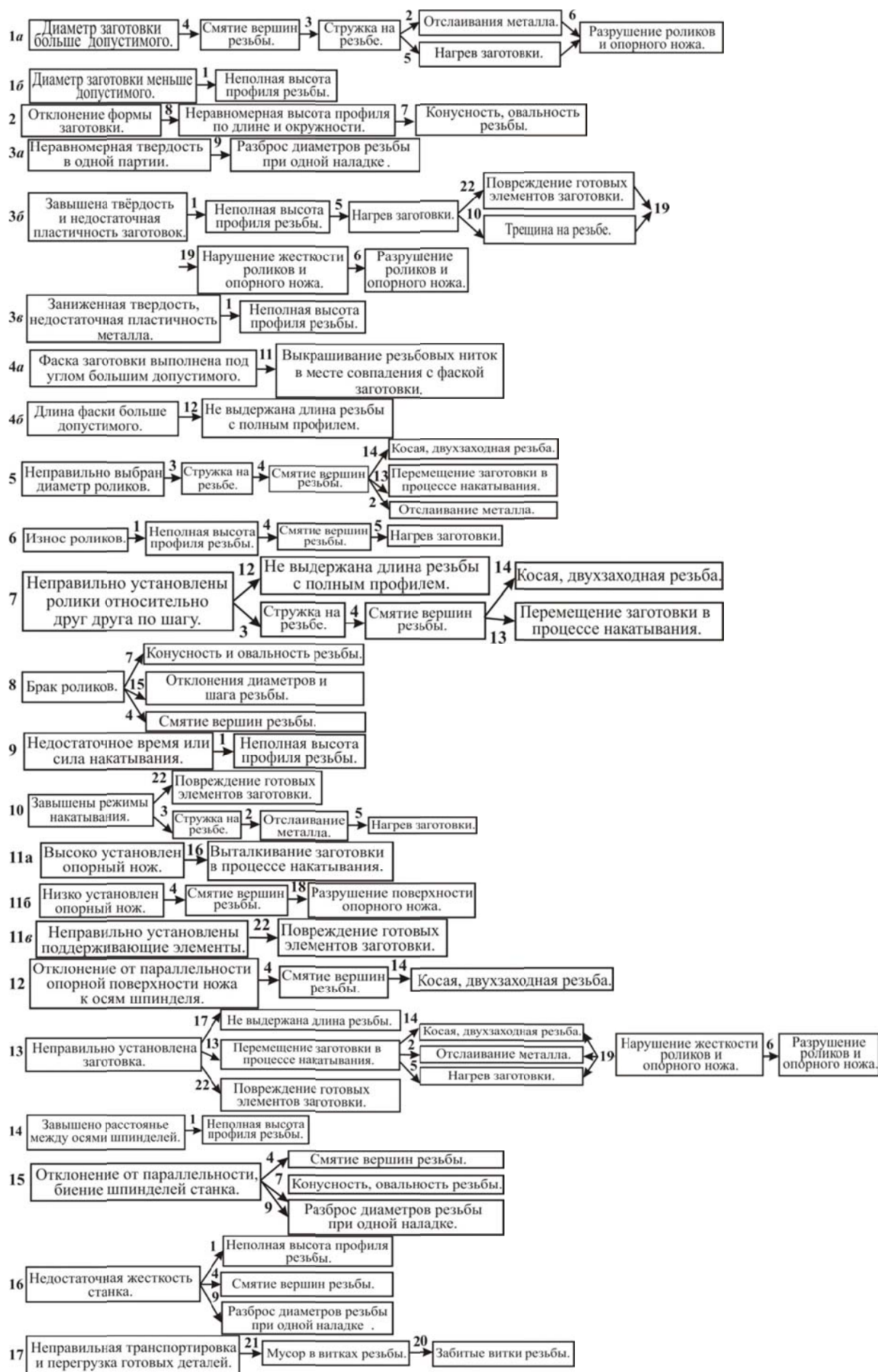


Рисунок 4 — Анализ взаимосвязанных отказов при накатывании резьбы на двухроликовом станке

Одним из важных преимуществ резбонакатывания является его высокая производительность, порождающая следующую проблему: внезапные и параметрические отказы процесса, не вызывающие непосредственно остановку оборудования и не обнаруженные своевременно, приводят к выпуску значительного количества РД с явными и скрытыми дефектами, устранить которые в подавляющем большинстве случаев невозможно.[4,5,11] Учитывая высокую стоимость РД для ответственных РС, проблема обеспечения стабильного качества при резбонакатывании остается очень актуальной.

Экономически нецелесообразно применять одинаковый алгоритм обеспечения и контроля качества РД 4,5,6 квалитетов из легированных сталей, предназначенных для ответственных, высоконагруженных РС, работающих в составе сложных ИМ и для крепежных деталей 8-11 квалитетов из углеродистых конструкционных либо автоматных сталей. Следует отметить, что достоверное выявление путем сплошного контроля всех РД скрытых дефектов в них, таких, как микротрещины, внутренние раковины, отклонения твердости, нестабильные свойства материала и другие, способные вызвать отказ ответственного РС в процессе эксплуатации синхронно с процессом резбонакатывания практически невозможно. Кроме того, даже выборочный контроль только явных дефектов РД, в т.ч. недопустимых погрешностей формы, шага, диаметров резьбы, полноты заполнения контура резьбы, наличия закатов, отслоения и шелушения металла и других также является трудоемким и затратным процессом. Взаимосвязь между вероятными в ходе процесса резбонакатывания отказами представлена на рисунке 3, а в формализованном и упрощенном виде – на рисунке 4. Из всех возможных внезапных и параметрических отказов, вероятных в процессе резбонакатывания, на рисунке 4 показаны только те, возникновение которых невозможно спрогнозировать и предотвратить при технологической подготовке производства и техническом обслуживании резбонакатного оборудования.

Накатывание резьбы на двухроликовых станках является высокоэффективным и, вместе с тем, сложным, многопараметрическим, стохастическим технологическим процессом [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Надёжность технологического процесса резбонакатывания зависит от ряда взаимосвязанных факторов, важнейшими из которых являются точность диаметра после шлифовальной операции и отклонения формы заготовки, в том числе размеры её фаски, твердость и пластичность материала, правильность установки заготовки на станок и степень износа либо повреждения резбонакатных роликов, соблюдение технологических режимов [2, 9, 14].

Технологический процесс резбонакатывания рассмотрим как дискретную систему, размеченный граф которой показан на рисунке 5. Для рассматриваемой системы введем следующие состояния: S_0 - станок исправен, параметры резьбовых деталей соответствуют всем требованиям; S_1 - диаметр заготовки больше или меньше допустимого; S_2 - недопустимые отклонения формы заготовки; S_3 - неравномерная твердость и пластичность заготовок в одной партии; S_4 - отклонения размеров и формы фаски на заготовке; S_5 - недопустимый износ роликов; S_6 - отклонения от параллельности опорной поверхности ножа и осей шпинделя; S_7 - неправильная установка заготовки; S_8 - завышенное расстояние между осями шпинделей; S_9 - отклонение от параллельности и биение шпинделей станка; S_{10} - недостаточная жесткость станка.

На рисунке 5 обозначены: λ_{01} и λ_{21} – соответственно интенсивности потоков отказов, связанных с отклонением диаметра заготовки; λ_{02} – интенсивность потока отказов, связанного с отклонением формы заготовки; λ_{03} – интенсивность потока отказов, связанного с неравномерной твердостью и пластичностью заготовок в одной партии; λ_{04} и λ_{24} – соответственно интенсивности потоков отказов, связанных с отклонением размеров и формы фаски на заготовке; λ_{75} – интенсивность потока отказов, связанного с недопустимым износом роликов; λ_{06} – интенсивность потока отказов, связанного с отклонением от параллельности опорной поверхности ножа и осей шпинделя; λ_{07} – интенсивность потока отказов, связанного с неправильной установкой заготовки; λ_{08} – интенсивность потока отказов, связанного с завышенным расстоянием между осями шпинделей; λ_{89} – интенсивность потока отказов, связанного с отклонением от параллельности и биением шпинделей станка; λ_{910} – интенсивность потока отказов, связанного с недостаточной жесткостью станка; μ_{10} – μ_{80} , μ_{98} , μ_{109} – соответственно интенсивности потоков восстановлений системы после отказов.

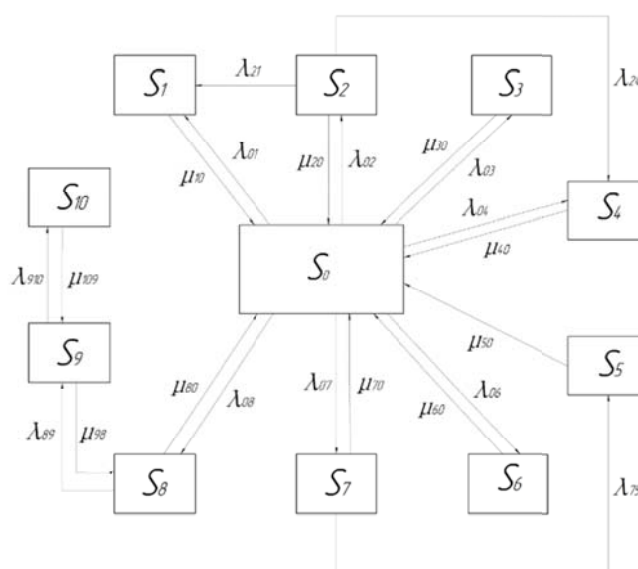


Рисунок 5 – Граф состояний технологического процесса резбонакатывания, представленного в виде дискретной системы

Граф состояний технологического процесса резбонакатывания построен на основе анализа экспериментальных результатов, представленных на рисунке 4, путем структурных упрощений, позволяющих избежать необходимости составления и решения излишне громоздкой системы уравнений. Предполагая, аналогично модели, предложенной в [9], потоки отказов и восстановления простейшими, а время безотказной работы t_0 и время восстановления работоспособности после отказа t_b , распределенными по экспоненциальному закону, используя методику, приведенную в [10], запишем для рассматриваемого процесса систему уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} P_0 \cdot (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} + \lambda_{06} + \lambda_{07} + \lambda_{08}) = \\ = P_1 \cdot \mu_{10} + P_2 \cdot \mu_{20} + P_3 \cdot \mu_{30} + P_4 \cdot \mu_{40} + \\ + P_5 \cdot \mu_{50} + P_6 \cdot \mu_{60} + P_7 \cdot \mu_{70} + P_8 \cdot \mu_{80}; \\ P_1 \cdot (\lambda_{21} + \lambda_{01}) = P_0 \cdot \mu_{10}; \\ P_2 \cdot (\lambda_{02} + \lambda_{24}) = P_0 \cdot \mu_{20}; \\ P_3 \cdot \lambda_{03} = P_0 \cdot \mu_{30}; \\ P_4 \cdot (\lambda_{04} + \lambda_{24}) = P_0 \cdot \mu_{40}; \\ P_5 \cdot \lambda_{75} = P_0 \cdot \mu_{50}; \\ P_6 \cdot \lambda_{06} = P_0 \cdot \mu_{60}; \\ P_7 \cdot (\lambda_{07} + \lambda_{75}) = P_0 \cdot \mu_{70}; \\ P_8 \cdot (\lambda_{08} + \lambda_{89}) = P_0 \cdot \mu_{80} + P_9 \cdot \mu_{98}; \\ P_9 \cdot (\lambda_{89} + \lambda_{910}) = P_8 \cdot \mu_{98} + P_{10} \cdot \mu_{109}; \\ P_{10} \cdot \lambda_{910} = P_9 \cdot \mu_{109}. \end{cases}, \quad (2)$$

Для решения системы уравнений Колмогорова (2) и расчета финальных вероятностей пребывания рассматриваемой системы в состояниях $S_0 \dots S_{10}$, используем экспериментальные данные об интенсивностях потоков отказов и восстановлений, представленные в таблицах 1 и 2:

Для решения системы уравнений Колмогорова (2), необходимо любое из уравнений системы заменить условием нормировки:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} = 1, \quad (3)$$

где $P_0...P_{10}$ – финальные вероятности пребывания системы в состояниях $S_0...S_{10}$ соответственно.

Решение системы уравнений производилось в программной среде Maple, пример результатов расчета для одного набора исходных данных с точностью до 10^{-4} представлен в таблице 3.

Таблица 1 – Экспериментальные значения интенсивностей потоков отказов, $ч^{-1}$

λ_{01}	λ_{02}	λ_{03}	λ_{04}	λ_{06}	λ_{07}	λ_{08}	λ_{21}	λ_{24}	λ_{75}	λ_{89}	λ_{910}
10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	10^{-4}

Таблица 2 – Экспериментальные значения интенсивностей потоков восстановлений после отказов, $ч^{-1}$

μ_{10}	μ_{20}	μ_{30}	μ_{40}	μ_{50}	μ_{60}	μ_{70}	μ_{80}	μ_{98}	μ_{109}
2,0	1,0	1,0	2,0	0,5	2,0	8,0	2,0	1,0	0,25

Таблица 3 – Результаты вычисления финальных вероятностей пребывания технологического процесса резбонакатывания в исправном и отказовых состояниях

P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0,8111	$4,9971 \times 10^{-3}$	$9,8692 \times 10^{-4}$	$9,9941 \times 10^{-3}$	$3,8986 \times 10^{-2}$	$4,9971 \times 10^{-5}$
P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	
$4,9971 \times 10^{-3}$	$1,2493 \times 10^{-2}$	$4,9971 \times 10^{-4}$	$4,9971 \times 10^{-6}$	$3,7592 \times 10^{-5}$	

Решая систему уравнений (2) с учетом условия нормировки (3), можем определять значения финальных вероятностей $P_0...P_{10}$ пребывания исследуемого технологического процесса в состояниях $S_0...S_{10}$, в зависимости от исходных данных, полученных при анализе результатов производственного эксперимента.

Анализ полученных результатов. Производственные эксперименты позволили достоверно установить, что отказы, проявляющиеся в процессе резбонакатывания, могут быть как независимыми друг от друга, так и взаимосвязанными, причем роль последних в появлении дефектных РД следует обязательно учитывать. Исследование взаимосвязей между отказами позволило выделить факторы, влияющие на надежность РР. В частности, в процессе резбонакатывания надежность РР характеризуется их стойкостью, т.е. способностью накатать максимальное количество РД, соответствующих стандарту по параметрам точности резьбы. [6,10,15,16]. Экспериментально подтверждено, что при накатывании резьбы на заготовках, имеющих форму и размеры в пределах заданных допусков, при условии стабильности значений твердости и соответствующей стандарту пластичности материала, стойкость РР может достигать значений, близких к теоретическим, определенным по (1). Анализ значений финальных вероятностей пребывания исследуемого процесса в отказовых состояниях $P_1...P_{10}$ позволяет корректно ставить и решать задачу оптимального распределения ограниченных финансовых и иных ресурсов, направляемых на повышение надежности, в т.ч. на техническое обслуживание, модернизацию и реновацию технологического оборудования.[17]

Таким образом, предлагаемая математическая модель может использоваться для анализа и оптимального использования имеющихся резервов повышения качества и производительности процесса накатывания РД с НР.

Направление дальнейших исследований связано с уточнением границ применимости и возможностей практического использования предложенной модели, а также применением для моделирования математического аппарата полумарковских процессов [17], что позволит

определять фактическую производительность процесса резбонакатывания с учетом его надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек А.В. Перспективы развития резбонакатывания / А.В. Киричек, А.В. Афонин // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение: сб. науч. тр. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – № 4 – С. 36 – 41.
2. Киричек А.В. Состояние производства резбонарезного оборудования и инструмента в Российской Федерации / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение: сб. науч. тр. – Орел, 2006. – № 2. – С. 10 – 15.
3. Липка В.М. Технологическое обеспечение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных двигателей / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // НТУ «ХПИ». Двигатели внутреннего сгорания. – Хайков, 2012. – №2. – С. 109 – 113.
4. Рапацкий Ю.Л. Анализ факторов, вызывающих релаксацию и разрушение резьбовых соединений в изделиях машиностроения / Ю.Л. Рапацкий, В.М. Липка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-1. – С. 75 – 81.
5. Липка В.М. Исследование влияния параметров резьбовых крепежных деталей на качество сборки изделий машиностроения / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // М.: Машиностроение. Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – №11 – С. 21 – 27.
6. Якухин В.Г. Изготовление резьб / В.Г. Якухин, В.А. Ставров – Справочник: М.: Машиностроение, 1989 – 192 с.
7. Липка В.М. Анализ воздействия технологической наследственности при изготовлении деталей с резьбой на надежность резьбовых соединений в судовых машинах и механизмах / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Ушаковские чтения: Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции (Севастополь, 22-23 февраля 2018 г.). – Севастополь: ООО «ПК КИА», 2018. – С. 61 – 69
8. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
9. Липка В.М. Повышение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных силовых агрегатов / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. трудов. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2012. – Вып.1 (22). – С. 199-210.
10. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резбонакатывание.: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
11. Липка В.М. Экспериментальное исследование причин взаимосвязанных отказов при резбонакатывании / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: матер. междунар. науч. – технической конф., Севастополь, 5 – 10 сентября 2011 г. – Севастополь.: Изд-во СевНТУ, 2011. – С. 86 – 88.
12. Якухин В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки.: Учебник – под ред. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2011. – 362 с.
13. Пашков Е.В. Транспортно – накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве / Е.В. Пашков, В.Я. Копп, А.Г. Карлов. – К.: УМК ВО, 1992 – 536 с.
14. Афонин А.Н. Схемы деформирования при накатывании резьб / А.Н. Афонин, А.В. Киричек // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: сб. науч. тр. – Орел, 2009. – Вып. 6/278 (577). – С. 39 – 42.
15. Киричек А.В. Определение диаметра заготовок под накатывание резьбы с помощью систем 3D моделирования / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // СТИН. – 2005. – №6. – С. 28 – 30.
16. Прокофьев А.Н. Разработка системы выбора оптимального метода обработки резьбы. // Качество машин. Сборник трудов. Брянск. – БГТУ. – 2001. – С. 88 – 89.
17. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: монография / В.Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.

Липка Виктория Михайловна
 Филиал ФГБОУ ВО
 «ГМУ им. Адм. Ф.Ф. Ушакова» в г.
 Севастополь,
 магистр, ст. преподаватель,
 аспирант,
 299001 г. Севастополь ул. Героев
 Севастополя, 7
 +7(978)7673271
 lipka.vita@yandex.ru,

Братан Сергей Михайлович
 ФГАОУ ВО «Севастопольский
 государственный университет»
 299053 г. Севастополь ул.
 Университетская, 33
 доктор технических наук,
 профессор, заведующий
 кафедрой «Технология
 машиностроения»
 serg.bratan@gmail.com

Рапацкий Юрий Леонидович
 ФГАОУ ВО «Севастопольский
 государственный университет»
 299053 г. Севастополь ул.
 Университетская, 33
 канд. техн. наук, доц., директор
 Центра оценки качества
 образования
 +7(978)7679650
 u.l.rapatskiy@mail.ru.

INVESTIGATION RELIABILITY OF THE PROCESS ROLLING OUTSIDE THREADS WITH THE ACCOUNT OF INTERRELATED FAILURES

Abstract. *The influence of various factors causing interrelated failures in the process of rolling of external threads M6...M20 on double-roller thread-rolling machines is considered. A mathematical model is proposed that makes it possible to quantify the effect of interconnected failures on the reliability of the rolling process of the external thread.*

Keywords: *external threading, thread rolling, interconnected failures, reliability of thread-rolling process.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kirichek A.V. Perspektivy razvitiya rezbonakatyvaniya / A.V. Kirichek, A.V. Afonin // Izvestiya OrelGTU. Ser. Mashinostroyeniye. Priborostroyeniye: sb. nauch. tr. – Orel: OrelGTU, 2003. – № 4 – S. 36 – 41.
2. Kirichek A.V. Sostoyaniye proizvodstva rezbonareznogo oborudovaniya i instrumenta v Rossiyskov Federatsii / A.V. Kirichek, A.N. Afonin // Izvestiya OrelGTU. Ser. Mashinostroyeniye. Priborostroyeniye: sb. nauch. tr. – Orel, 2006. – № 2. – S. 10 – 15.
3. Lipka V.M. Tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti rezbovykh sovedineniy pri sborke avtomobilnykh dvigateley / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // NTU «KHPI». Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – Khakov, 2012. – №2. – S. 109 – 113.
4. Rapatskiy Yu.L. Analiz faktorov, vyzvayushchikh relaksatsiyu i razrusheniye rezbovykh sovedineniy v izdeliyakh mashinostroyeniya / Yu.L. Rapatskiy, V.M. Lipka // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – № 4-1. – S. 75 – 81.
5. Lipka V.M. Issledovaniye vliyaniya parametrov rezbovykh krepezhnykh detaley na kachestvo sborki izdeliy mashinostroyeniya / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // M.: Mashinostroyeniye. Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2010. – №11 – S. 21 – 27.
6. Yakukhin V.G. Izgotovleniye rezb. / V.G. Yakukhin, V.A. Stavrov – Spravochnik: M.: Mashinostroyeniye, 1989 – 192 s.
7. Lipka V.M. Analiz vozdevstviya tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii detaley s rezbov na nadezhnost rezbovykh sovedineniy v sudovykh mashinakh i mekhanizmach / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // Ushakovskiy chteniya: Materialy Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sevastopol, 22-23 fevralya 2018 g.). – Sevastopol: OOO «PK KIA», 2018. – S. 61 – 69
8. Yakukhin V.G. Optimalnaya tekhnologiya izgotovleniya rezb / V.G. Yakukhin – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.
9. Lipka V.M. Povysheniye nadezhnosti rezbovykh sovedineniy pri sborke avtomobilnykh silovykh agregatov / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // Vysokiy tekhnologii v mashinostroyenii: sb. nauch. trudov. – Kharkov, NTU «KHPI», 2012. – Vyp. 1 (22). – S. 199-210.
10. Kirichek A.V., Afonin A.N. Rezbonakatyvaniye.: Biblioteka tekhnologa. – M.: Mashinostroyeniye, 2009. – 312 s.
11. Lipka V.M. Eksperimentalnoye issledovaniye prichin vzaimosvazannykh otkazov pri rezbonakatyvanii / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: mater. mezhdunar. nauch. – tekhnicheskoy konf., Sevastopol, 5 – 10 sentyabrya 2011 g. – Sevastopol.: Izd-vo SevNTU, 2011. – S. 86 – 88.
12. Yakukhin V.G. Vysokotekhnologichnyye metody metalloobrabotki.: Uchebnik – pod red. O.V. Taratynova. – M.: MGIU, 2011. – 362 s.
13. Pashkov Ye.V. Transportno – nakopitelnyye i zagruzochnyye sistemy v sborochnom proizvodstve / Ye.V. Pashkov, V.YA. Kopp, A.G. Karlov. – K.: UMK VO, 1992 – 536s.
14. Afonin A.N. Skhemy deformirovaniya pri nakatyvanii rezb / A.N. Afonin, A.V. Kirichek // Izvestiya OrelGTU. Ser. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii: sb. nauch. tr. – Orel, 2009. – Vyp. 6/278 (577). – S. 39 – 42.
15. Kirichek A.V. Opredeleniye diametra zagotovok pod nakatyvaniye rezby s pomoshchyu sistem 3D modelirovaniya / A.V. Kirichek, A.N. Afonin // STIN. – 2005. – №6. – S. 28 – 30.
16. Prokofyev A.N. Razrabotka sistemy vybora optimalnogo metoda obrabotki rezby. // Kachestvo mashin. Sbornik trudov. Bryansk. – BG TU. – 2001. – S. 88 – 89.
17. Kopp V.YA. Modelirovaniye avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem: monografiya / V.YA. Kopp. – Sevastopol: SevNTU, 2012. – 700 s.

Lipka Viktoria Mikhailovna
Branch of FSBEU HE
"SMU named after
Adm. F.F. Ushakov"
in the city of Sevastopol,
Master, Senior teacher,
graduate student,
299001 c. Sevastopol,
7, Heroes of Sevastopol street.
+7(978)7673271
lipka.vita@yandex.ru

Bratan Sergey Mikhailovich
Sevastopol State University
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head of
Chair of "Technology of Mechanical
Engineering"
299053 c. Sevastopol, 33 University
street
+7(978)7155019
serg.bratan@gmail.com

Rapatskiy Yuriy Leonidovich
Sevastopol State University
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Director of the
Center for Educational Quality
Assessment
299053 c. Sevastopol, 33 University
street
+7(978)7679650
u.l.rapatskiy@mail.ru

А.В. ДОЛОГЛОНЯН, А.К. СУХОВ, И.Н. СТАЦЕНКО

УСТРОЙСТВО ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАВУЧЕСТИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. Проведен анализ факторов, влияющих на автономность морских ныряющих буёв. Предложен вариант устройства изменения плавучести, использующий гидроцилиндр для повышения эффективности электрогидравлической системы на больших глубинах. Произведена оценка энергопотребления энергосберегающего режима всплытия/погружения буя.

Ключевые слова: ныряющий буй, плавучесть, подводный аппарат, энергопотребление.

Введение.

Профильные измерения являются важной частью мониторинга морской среды. Эти измерения осуществляют регистрацию вертикальной структуры полей температуры, солености, концентрации растворенного кислорода и прозрачности морской воды. Данные, полученные в результате измерений имеют важное значение в прогнозировании глобальных изменений климата, оценке экологического состояния морей и океанов, расчёте дальности действия гидролокационных систем, а также в оценках тепло- и солезапаса [1, 2].

Техническими средствами, которые обеспечивают профильные измерения, являются автономные морские дрейфтеры – подвижные платформы сбора данных, которые оснащаются датчиками регистрации параметров морской воды, а также системами управления и космической связи [3].

Конструкция дрейфтеров типа APEX, PROVOR, NINJA и др. представляет собой корпус формы, имеющей ось вращения, внутри которого расположены приборная часть, система изменения плавучести, источник автономного питания. Корпус, обычно, оснащен диском стабилизации, для фиксации дрейфтера в вертикальном положении на поверхности океана при передаче данных, а также антенной космической связи и набором датчиков, осуществляющих регистрацию необходимых параметров воды в текущей точке Мирового океана. Погружение и всплытие данного вида устройств осуществляется за счет изменения плавучести относительно нейтрального состояния (нулевой плавучести). Это изменение достигается тремя различными способами, представленными на рисунок 1.

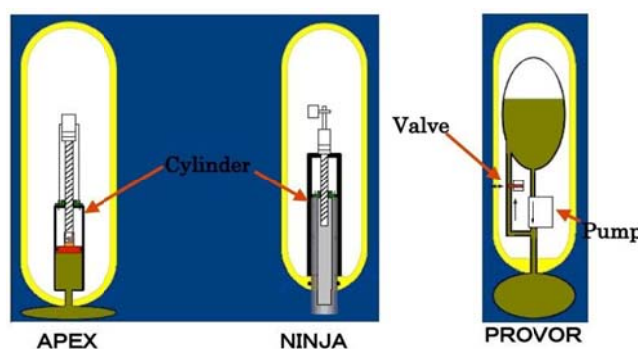


Рисунок 1 – Принцип изменения плавучести в различных типах дрейфтеров

В моделях типа APEX плавучесть изменяется в процессе перекачивания рабочей жидкости насосом, расположенным внутри корпуса дрейфтера, в камеру плавучести переменного объёма, расположенную в его нижней части. В моделях типа NINJA привод электромотора запускает механизм, увеличивающий объем дрейфтера за счет телескопического выдвижения дополнительной цилиндрической части. В моделях типа PROVOR используют принцип перекачивания рабочей жидкости из внутреннего резервуара во внешнюю камеру плавучести, для этого применяется гидравлический привод с

перепускным клапаном и насосом, а также используется разделение каналов.

Существующие модели дрейфтеров, например, типа APEx[4], способны погружаться на глубины до 4000 м. Однако, с увеличением глубины погружения растет нагрузка устройство, обеспечивающее изменение плавучести и затраты энергии на управление плавучестью подводного аппарата (ПА), что приводит к снижению надежности и автономности[5].

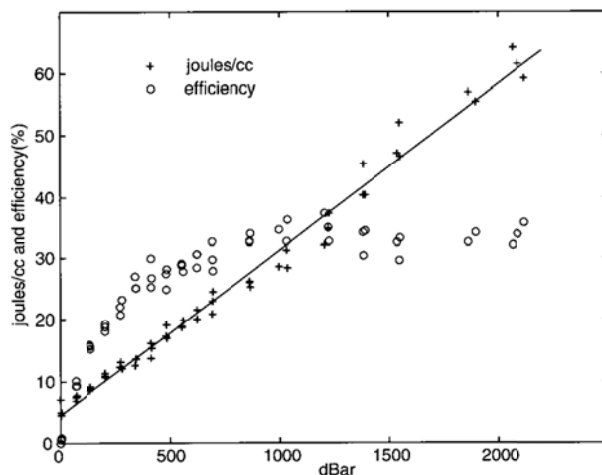


Рисунок 2 –Зависимость затрат энергии на прокачку 1 см³ жидкости (+) во внешний ресивер и эффективности (о) системы управления плавучестью от глубины погружения [5]

Зависимость, полученная в [5]показывает, что энергия, затрачиваемая на изменение объема внешнего ресивера прямо пропорциональна глубине погружения

$$E_v = 5 + 0,027 z, \quad (1)$$

где E_v – энергия необходимая на прокачку 1 см³ жидкости, Дж/см³;
 z –глубина погружения, м.

Конструкции дрейфтеров типа APEx, PROVOR и ARGO предусматривают наличие гидравлической системы. При больших глубинах(более 4000 м) давление в гидравлической системе вырастает до значений более 40 МПа, что является предельным для большинства типов насосов, применяемых в гидравлических системах. Это обстоятельство не может не сказываться на надежности устройств изменения плавучести ПА.

Для наиболее эффективных аксиально-поршневых насосов [6] повышение давления в системе более 10 Мпа, как изображено на рисунке 3, приводит к падению эффективности пары насос-электродвигатель.

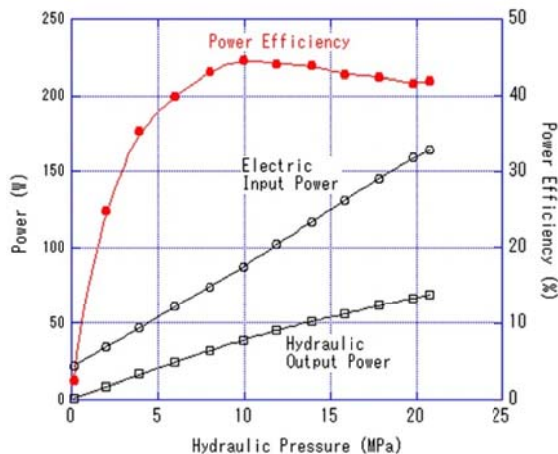


Рисунок 3 –Зависимость эффективности электрогидравлической системы от внешнего давления[6]

Снижение эффективности происходит прежде всего из-за перетечек рабочего тела, определяющих объемный КПД, а, следовательно, и общую эффективность насосов. Объем перетечек рабочего тела сильно зависит от глубины погружения (внешнего давления), что наглядно продемонстрировано на рисунке 4.

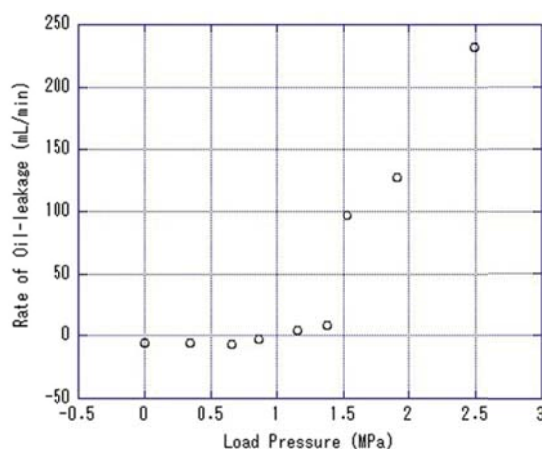


Рисунок 4 – Зависимость внутренних перетечек в гидравлической системе от внешнего давления [6]

Данная работа рассматривает применение гидроусилителей для создания устройств изменения плавучести для погружения на большие глубины.

Устройство изменения плавучести ПА с гидравлическим усилителем и внутренним расположением ресивера переменного объема.

Схема подобного устройства изображена на рисунке 5.

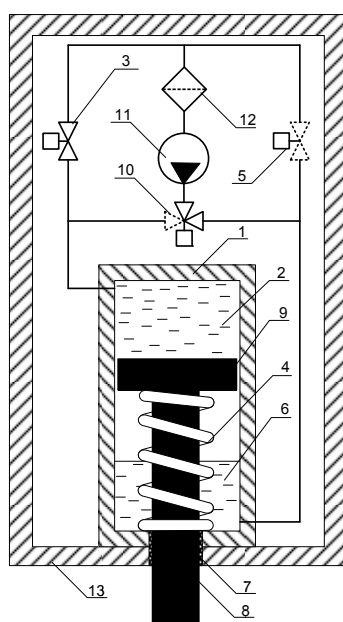


Рисунок 5 – Схема устройства изменения плавучести ПА с гидравлическим усилителем и внутренним расположением ресивера переменного объема [7]:

1 – гидравлический цилиндр; 2 – надпоршневое пространство; 3, 5, 10 – управляемые клапаны; 4 – пружина; 6 – подпоршневое пространство; 7 – уплотнение; 8 – шток поршня; 9 – поршень; 11 – приводной насос; 12 – фильтр; 13 – корпус ПА

Устройство изменения плавучести ПА работает в двух режимах – всплытия и погружения. При использовании устройства в режиме всплытия клапан 3 находится в положении «закрыто», а клапан 5 в положении «открыто», при этом клапан 10 переключает сторону нагнетания насоса 11 на надпоршневую полость 2 цилиндра 1, а всасывающая

сторона насоса 11 замыкается на подпоршневую полость 6. Приведение в действие насоса 11 производит перемещение рабочей жидкости из подпоршневой полости 6 в надпоршневую полость 2, что приводит к перемещению поршня 9 вниз, сжатию пружины 4 и расширению находящегося в подпоршневой полости 6 инертного газа и выдвигению части штока 8 за пределы гидравлического цилиндра 1 через уплотнение 7 в окружающую среду, а это, в свою очередь, приводит к увеличению плавучести ПА.

При использовании устройства в режиме погружения клапан 3 и 5 находятся в положении «закрыто», а клапан 10 соединяет подпоршневую полость 6 цилиндра 1 непосредственно с надпоршневой полостью 2. При этом, сжатая в режиме всплытия пружина 4 производит перемещение рабочей жидкости из надпоршневой полости 2 в подпоршневую полость 6, что приводит к перемещению поршня 9 вверх и соответственно части штока 8 из окружающей среды в пределы гидравлического цилиндра 1 через уплотнение 7, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению плавучести ПА.

Таким образом, перемещением поршня и штока в гидравлическом цилиндре можно управлять плавучестью ПА, а, следовательно, и скоростью погружения/всплытия, а также стабилизировать ПА на заданной глубине.

Устройство изменения плавучести ПА с гидравлическим усилителем и внешним расположением ресивера переменного объема.

Схема подобного устройства изображена на рисунке 6.

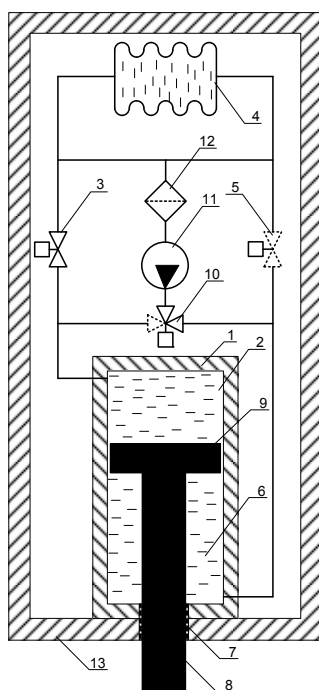


Рисунок 6 – Схема устройства изменения плавучести ПА с гидравлическим усилителем и внешним расположением ресивера переменного объема[7]:

1 – гидравлический цилиндр; 2 – надпоршневое пространство; 3, 5, 10 – управляемые клапаны; 4 – ресивер переменного объема; 6 – подпоршневое пространство; 7 – уплотнение; 8 – шток поршня; 9 – поршень; 11 – приводной насос; 12 – фильтр; 13 – корпус ПА

Представленное на рисунке 6 устройство изменения плавучести ПА, как и предыдущее, работает в двух режимах – всплытия и погружения. При использовании устройства в режиме всплытия клапан 3 находится в положении «закрыто», а клапан 5 в положении «открыто», при этом клапан 10 переключает сторону нагнетания насоса 11 на надпоршневую полость 2 цилиндра 1, а всасывающая сторона насоса 11 замыкается на подпоршневую полость 6. Приведение в действие насоса 11 производит перемещение рабочей жидкости из подпоршневой полости 6 в надпоршневую полость 2, что приводит к перемещению поршня 9 вниз и выдвигению части штока 8 за пределы гидравлического

цилиндра 1 через уплотнение 7 в окружающую среду, а это, в свою очередь, приводит к увеличению плавучести ПА. Ресивер переменного объема 4 необходим для компенсации объема жидкости эквивалентному объему штока, выдвинутому в окружающую среду, а также температурного расширения и сжимаемости рабочей жидкости.

При использовании устройства в режиме погружения клапан 3 находится в положении «открыто», а клапан 5 в положении «закрыто», при этом клапан 10 переключает сторону нагнетания насоса 11 на подпоршневую полость 6 цилиндра 1, а всасывающая сторона насоса 11 замыкается на надпоршневую полость 2. Приведение в действие насоса 11 производит перемещение рабочей жидкости из надпоршневой полости 2 в подпоршневую полость 6, что приводит к перемещению поршня 9 вверх и соответственно части штока 8 из окружающей среды в пределы гидравлического цилиндра 1 через уплотнение 7, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению плавучести ПА. Ресивер переменного объема 4 необходим для компенсации объема жидкости эквивалентному объему штока, перемещенного внутрь цилиндра, а также температурного расширения и сжимаемости рабочей жидкости.

Таким образом, перемещением поршня и штока в гидравлическом цилиндре можно управлять плавучестью ПА, а, следовательно, и скоростью погружения/всплытия, а также стабилизировать ПА на заданной глубине.

На рисунке 7 изображены результаты моделирования первого варианта устройства [7] с использованием гидроцилиндра.

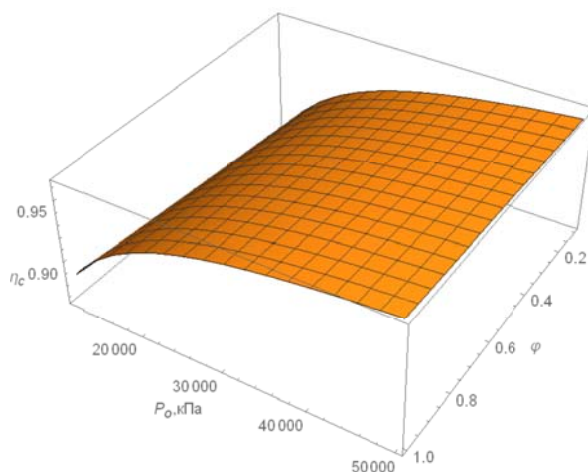


Рисунок 7 – Зависимость эффективности гидроцилиндра от глубины погружения и степени погружения штока: P_o – внешнее давление, кПа; φ – доля хода штока

На рисунке 8 изображены результаты моделирования второго варианта устройства [7] с использованием гидроцилиндра.

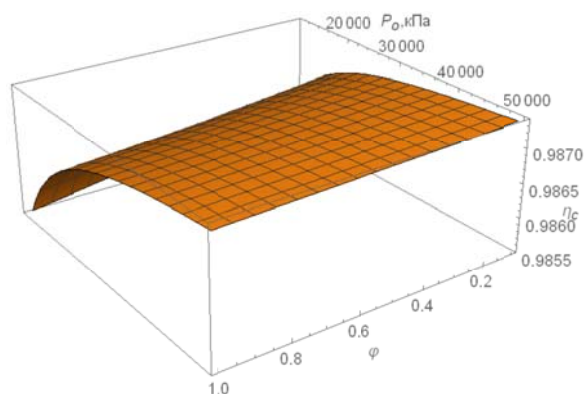


Рисунок 8 – Зависимость эффективности второго варианта гидроцилиндра от глубины погружения и степени погружения штока: P_o – внешнее давление, кПа; φ – доля хода штока

Существующие материалы, например капролон, позволяют обеспечить гидравлическому цилиндру практически нулевую плавучесть, что позволит не уменьшать грузоподъемность ПА, при этом эффективность самого гидроцилиндра находится на очень высоком уровне.

Определение необходимого объема внешнего ресивера.

Поскольку температура (T) и соленость (S) являются функциями координаты (z), то можно сказать, что и плотность в целом является функцией координаты, т.е.

$$\rho_f(T, S, z) = \rho_f(z).$$

Будем полагать, что

$$\rho_f(z) = \rho_{fm} + \Delta\rho(z), \quad (2)$$

$$\rho_{fm} = \frac{1}{2} [\rho_f(z_{\min}) + \rho_f(z_{\max})]. \quad (3)$$

где ρ_{fm} – средняя по глубине плотность, кг/м³;

$\Delta\rho(z)$ – приращение плотности, кг/м³, может быть, как положительным, так и отрицательным;

$z_{\max}$ – максимальная глубина, м;

$z_{\min}$ – минимальная глубина, м.

Рассмотрим условие нулевой плавучести на максимальной глубине

$$mg = \rho_f(z_{\max})g(V_a - \Delta V_{f\min}), \quad (4)$$

где m – масса подводного аппарата, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

V_a – объем аппарата при нулевой плавучести при средней плотности ρ_{fm} , м³;

$\Delta V_{f\min}$ – изменение объема внешнего ресивера на максимальной глубине, м³.

Базовую массу ПА можно представить следующим образом

$$m = \rho_{fm}V_a, \quad (5)$$

Подставим выражения (2) и (5) в уравнение (4) и выразим $\Delta V_{f\min}$.

$$\Delta V_{f\min} = V_a \left[\frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm} + \Delta\rho(z_{\max})} \right]. \quad (6)$$

Учитывая, что порядок величины $\frac{\Delta\rho(z)}{\rho_{fm}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ мал, то (6) примет вид

$$\Delta V_{f\min} \cong \frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm}} V_a. \quad (7)$$

Поскольку, что нулевая плавучесть должна достигаться как на максимальной, так и минимальной глубинах, необходимый объем внешнего ресивера с учетом (7) равен удвоенному изменению объема внешнего ресивера на максимальной глубине, или

$$\Delta V_f = 2\Delta V_{f\min} \cong 2 \frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm}} V_a. \quad (8)$$

Анализ уравнения состояния морской воды [8] показывает, что зависимость приращения плотности от глубины погружения можно без большой погрешности считать линейной.

Из рисунка 9 можно заключить, что $\Delta\rho(z) \propto z$, а согласно (8) $\Delta V_f \propto \Delta\rho(z)$, следовательно $\Delta V_f \propto z$, а поскольку затраты энергии на изменение объема внешнего ресивера равны [9, 10]

$$E_u = 10^4 z \Delta V_f, \quad (9)$$

то следует получается, что $E_u \propto z^2$.

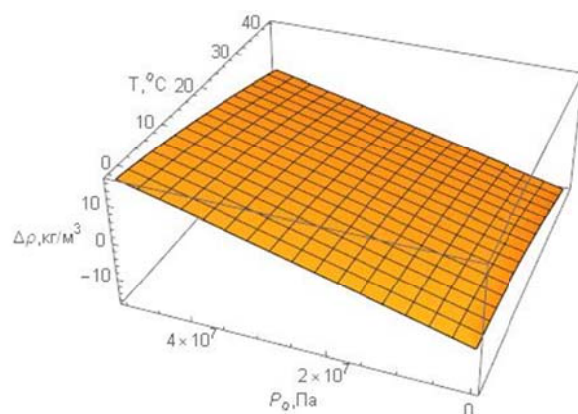


Рисунок 9 – Зависимость приращения плотности от внешнего давления (глубины погружения) и температуры морской воды при солености 35‰

Это значит, что автономность ныряющего буя резко снижается с ростом глубины погружения и конструкционные способы увеличения автономности имеют предел, поэтому задача снижения затрат энергии режимными способами является актуальной.

Оптимальный режим погружения/всплытия. Снижать энергетические затраты погружении/всплытии можно не только повышая эффективность устройств изменения плавучести, но и подбирая оптимальный режим погружения/всплытия. Рассмотрим процесс ступенчатого погружения/всплытия.

Из выражения (9) и его следствия получается, что уменьшение энергетических затрат на всплытие пропорционально квадрату уменьшения глубины погружения. Предположим, глубина погружения z разбита на n участков и на каждом из участков происходит изменение объема внешнего ресивера равное $\frac{\Delta V_f}{n}$, тогда общие затраты энергии на всплытие можно представить в виде ряда

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{n} + \sum_{i=1}^n \left[10^4 z_{\max} \left(1 - \frac{i}{n} \right) \frac{\Delta V_f}{n} \right], \text{ или}$$

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{n} \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i}{n} \right) \right]. \quad (10)$$

Величина $\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i}{n} \right)$ представляет собой арифметическую прогрессию, сумма которой, как известно[5], определяется по формуле

$$S_n = \frac{a_1 + a_n}{2} n, \quad (11)$$

где a_1 – первый член арифметической прогрессии,
 a_n – n -й член арифметической прогрессии.

Из выражения (10) видно, что $a_1 = 1 - \frac{1}{n}$; $a_n = 0$, тогда, подставляя эти величины в формулу (11) получим значение суммы арифметической прогрессии

$$S_n = \frac{a_1 + a_n}{2} n = \frac{1 - \frac{1}{n}}{2} n = \frac{n-1}{2}. \quad (12)$$

Подставим результат (12) в выражение (10) получим

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{2} \frac{n+1}{n}. \quad (13)$$

Снижение энергоемкости процесса всплытия рассчитывается из отношения уравнения (13) к уравнению (9), или

$$\frac{E_u(n)}{E_u} = \frac{1}{2} \frac{n+1}{n}. \quad (14)$$

При непрерывном изменении объема внешнего ресивера (при $n \rightarrow \infty$) снижение энергозатрат составит 100%, что видно из ниже следующей зависимости

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E_u(n)}{E_u} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} = \frac{1}{2}. \quad (15)$$

Заключение.

Анализ рисунков 7 и 8 показывает, что эффективность гидроцилиндров очень высока, особенно второго варианта. Применение гидроцилиндров увеличивает размеры и массу дрифтера по сравнению с системами PRORVOR, но уменьшает по сравнению с другими системами, также имеет и свои преимущества, указанные ниже.

Преимущества применения гидроцилиндров:

1. понижается давление в гидравлической системе устройства, что способствует повышению надежности оборудования, особенно, при высоких глубинах погружения;
2. снижаются требования к максимальному давлению насоса, но повышаются требования к его производительности пропорционально коэффициенту усиления, это позволяет применять менее ответственное оборудование, которое имеет меньший вес, а также позволяет ему работать на номинальной производительности при максимальной эффективности;
3. поскольку увеличение продолжительности работы оборудования пропорционально коэффициенту усиления, то отрицательное влияние переходных процессов при пуске оборудования нивелируется.

Применение ступенчатого погружения/всплытия позволяет существенно, до 50 % экономить заряд источника энергии, повышая автономность ПА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Г.В. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев, Г.К. Коротаев, В.С. Ястребов, С.В. Мотыжев. — М.: Наука, 2005. — 795 с.
2. Лазарюк А.Ю. Устранение динамических погрешностей данных СТД измерения в океане / А.Ю. Лазарюк, В.И. Пономарев // Вестник ДВО РАН. 2006. №4 — С. 106 – 111.
3. Краснодубец Л.А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН. Серия ТиСУ. — 2008. №2. — С. 141. – 153.
4. Web ресурс: <https://www.hydro-international.com/content/news/apex-deep-profiling-float-descends-to-4-000-metres>(дата обращения: 06.09.2017).
5. Davis R.E., Sherman J.T., Dufour J. Profiling ALACEs and Other Advances in Autonomous Subsurface Floats, Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology, 2000. V 18. P 982-993/
6. Asakawa K., Wataria K., Ohuchib H., Nakamurac M., Hyakudomea T., Ishiharaa Y. Buoyancy engine developed for underwater gliders. AdvancedRobotics, 2016 V 30, N 1, P. 41-49.
7. Дологлонян А.В. Сухов А.К., Стаценко И.Н. Устройство изменения плавучести для глубоководных измерений// Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ИПТС, 2017. – Вып. 9 (29). – С. 5–14.
8. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).
9. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972. – 672с.
10. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.

Дологлонян Андрей Вартазарович
ФГБНУ Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Сухов Андрей Константинович
ФГБНУ Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь
Доктор технических наук, главный научный сотрудник
E-mail: andrey.sukhov.37@mail.ru

Стаценко Иван Николаевич
ФГБНУ Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
E-mail: stacenko-ivan@inbox.ru

THE DEVICE OF CHANGE OF BUOYANCY OF UNDERSEA VEHICLE FOR DEEP-WATER MEASUREMENTS

Abstract. *The analysis of the factors influencing autonomy sea diving buoys is carried out. The version of the device of change of buoyancy using a hydraulic cylinder for increase in efficiency of an electrohydraulic system on no-bottoms is offered. Assessment of energy consumption of the energy saving mode of emersion/immersion of a buoy is made.*

Keywords: *the diving buoy, buoyancy, undersea vehicle, energy consumption.*

BIBLIOGRAPHY

1. Smirnov G.V. Okeanologiya: sredstva i metody okeanologicheskikh issledovaniy / G.V. Smirnov, V.N. Ereemeev, M.D. Ageev, G.K. Korotaev, V.S. Yastrebov, S.V. Motyzhev. — M.: Nauka, 2005. — 795 s.
2. Lazaryuk A.YU. Ustranenie dinamicheskikh pogreshnostey dannyh STD izmereniya v okeane / A.YU. Lazaryuk, V.I. Ponomarev // Vestnik DVO RAN. 2006. №4 — С. 106 — 111.
3. Krasnodubec L.A. Terminal'noe upravlenie v morskikh nablyudatel'nyh sistemah s podvizhnymi platformami sbora dannyh // Izv. RAN. Seriya TiSU. — 2008. №2. — S. 141. — 153.
4. Web resurs: <https://www.hydro-international.com/content/news/apex-deep-profiling-float-descends-to-4-000-metres>(data obrashcheniya: 06.09.2017).
5. Davis R.E., Sherman J.T., Dufour J. Profiling ALACEs and Other Advances in Autonomous Subsurface Floats, Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology, 2000. V 18. P 982-993/
6. Asakawa K., Wataria K., Ohuchib H., Nakamurac M., Hyakudomea T., Ishiharaa Y. Buoyancy engine developed for underwater gliders. AdvancedRobotics, 2016 V 30, N 1, P. 41-49.
7. Dologlonyan A.V. Suhov A.K., Stacenko I.N. Ustrojstvo izmeneniya plavuchesti dlya glubokovodnyh izmerenij// Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. — Sevastopol': IPTS, 2017. — Vyp. 9 (29). — S. 5–14.
8. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).
9. VukalovichM.P., NovikovI.I. Termodinamika. M.: Mashinostroenie, 1972. — 672s.
10. Emcev B.T. Tekhnicheskaya gidromekhanika. M.: Mashinostroenie, 1987. — 440 s.

Dologlonyan Andrej Vartazarovich
FGBNU Institut prirodno-
tekhnicheskikh sistem Rossijskoj
Federacii, g. Sevastopol'
Kandidat tekhnicheskikh nauk, starshij
nauchnyj sotrudnik
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Suhov Andrej Konstantinovich
FGBNU Institut prirodno-
tekhnicheskikh sistem Rossijskoj
Federacii, g. Sevastopol'
Doktor tekhnicheskikh nauk, glavnyj
nauchnyj sotrudnik
E-mail: andrey.sukhov.37@mail.ru

Stacenko Ivan Nikolaevich
FGBNU Institut prirodno-
tekhnicheskikh sistem Rossijskoj
Federacii, g. Sevastopol'
Kandidat tekhnicheskikh nauk, starshij
nauchnyj sotrudnik
E-mail: stacenko-ivan@inbox.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 4 до 10 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.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК;

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуточной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте <http://oreluniver.ru/public/file/science/journal/fipptt/>

Плата за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. (4862) 75–13–18
<http://oreluniver.ru>
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
+7(920)2806645, +7(906)6639898

<http://oreluniver.ru>
E-mail: tiostu@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 20.08.2018 г.
Дата выхода в свет
Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 12,438
Цена свободная. Тираж 600 экз.
Заказ _____

Отпечатано с готового оригинал–макета
на полиграфической базе ИП Синяев В.В.
302001, г. Орел, ул. Розы Люксембург, 10а