

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.22

**И. В. БОЯРКИНА
Е. В. ТАРАСОВ**

Сибирская государственная
автомобильно-дорожная академия,
г. Омск

ООО «Научно-производственный центр
«Динамика, надежность машин и комплексная
автоматизация» — НПЦ «Динамика»,
г. Омск

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ ТЕЛ КАЧЕНИЯ

Для подшипников качения центробежных насосных агрегатов в нефтепереработке установлены закономерности изменения их геометрических параметров и виброактивности в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: подшипник качения, роликоподшипник, шарикоподшипник, радиальная нагрузка, геометрическая характеристика подшипника, динамическая грузоподъемность, центробежный насосный агрегат.

Область применения центробежных насосных агрегатов очень обширная. Насосные агрегаты имеют мощность до 600 кВт и более и являются энергонасыщенными техническими системами, эффективность которых увеличивается при возрастании

мощности электродвигателя и частоты вращения вала [1–3].

В табл. 1 приведены наиболее распространенные типы подшипников качения для нефтеперерабатывающей промышленности. В развитии

Таблица 1

**Основные параметры и характеристики подшипников качения
центробежных насосных агрегатов, используемых в нефтепереработке**

Тип подшипника	Номинальный диаметр отверстия d , мм	Наружный диаметр D , мм	Диаметр тел качения D_w , мм	Число тел качения z	Динамическая грузоподъемность C , кН
Шарикоподшипники					
310–317	50–85	110–180	19–30,16	8	61,8–133
403–417	17–85	62–210	12,7–39,69	6–7	22,9–174
Роликоподшипники					
2408–2411	40–55	110–140	17–20	11–12	96,8–142
2305–2317	25–85	62–180	9–24	11–14	28,6–212

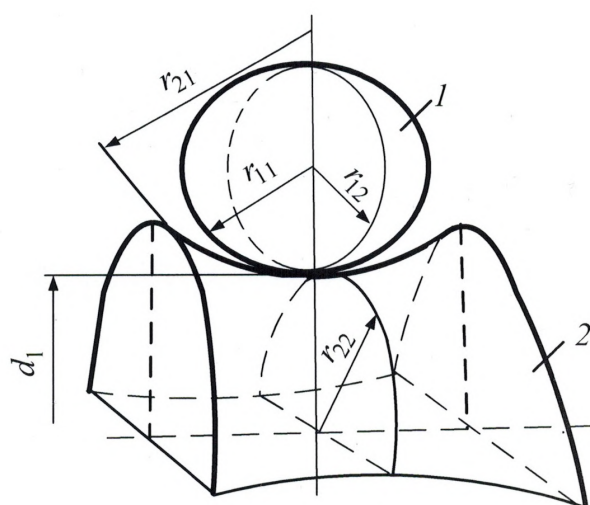


Рис. 1. Геометрические параметры шарикоподшипника

центробежных насосных агрегатов прослеживается тенденция увеличения динамической грузоподъемности при одновременном снижении числа тел качения и увеличения диаметров шариков и роликов. Поэтому возникает необходимость исследования нагруженности подшипников качения для заданной динамической грузоподъемности при малом числе тел качения.

Для подшипников качения благоприятным режимом работы, с точки зрения долговечности, является эксплуатация, при которой кольца и тела качения в зоне контакта совершают упругие деформации [4].

При длительной работе подшипника качения в зоне контакта тел качения с кольцами возникают микропластические деформации, которые накапливаются и приводят к необратимым изменениям формы и структуры контактирующих деталей. Напряженные состояния анализируются для разных режимов работы подшипников: модель идеально упругого состояния, модель упруго-пластического деформирования материала. Деформируемые материалы принимаются однородными и изотропными [4, 5]. При оценке напряженно-деформированного состояния шарикоподшипника, роликоподшипника методами теории упругости определяются размеры площадки контакта и нагрузки в зоне контакта. Характеристиками формы двух взаимодействующих тел является кривизна в точке контакта до при-

ложения нагрузки. Рассматривают максимальную и минимальную кривизну в точке контакта.

Для подшипника качения на рис. 1 показаны геометрические параметры. Для тела качения 1 и внутреннего кольца 2 в сечении показаны радиусы r_{11} и r_{12} , которые ортогональны. Для шарикоподшипника $r_{11}=r_{12}=0,5D_w$, где D_w — диаметр тела качения.

Минимальный радиус дорожки качения внутреннего кольца

$$2r_{22}=d_1=(d+D)\cdot 0,5-D_w$$

где d_1 — диаметр дорожки качения внутреннего кольца; d — номинальный диаметр отверстия; D — номинальный наружный диаметр.

Радиус желоба, дорожки качения, внутреннего кольца по рекомендациям ИСО [4]

$$r_{21}=0,52D_w$$

Кривизна кривых в точке контакта рассматривается как величина, обратная радиусу. Кривизна положительная для выпуклых поверхностей и отрицательная — для вогнутых. На рис. 1 величина $\rho_{21}=-\frac{1}{r_{21}}$ отрицательная, кривизна остальных кривых величина положительная.

Для шарикоподшипника характеристикой форм контактирующих тел является сумма главных кривизн [4]

$$\sum \rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22} = \frac{4}{D_w} - \frac{1}{0,52D_w} + \frac{2}{d_1} \quad (1)$$

Вспомогательная характеристика формы деформирующихся тел определяется по формуле работы [4]

$$\theta = \frac{(\rho_{11}-\rho_{12})+(\rho_{21}-\rho_{22})}{\sum \rho} \quad (2)$$

С помощью θ в работе [4, табл. 5.2] определяется величина ρ_0 , входящая в формулу контактных напряжений

$$\sigma_{z \max} = \frac{n_\sigma}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{2} \left(\sum \rho \right)^2 P_0} \quad (3)$$

где P_0 — максимальная радиальная сила тела качения, Н; η — характеристика упругих свойств материала контактирующих тел [4]

Параметры шарикоподшипников центробежных насосных агрегатов

Тип подшипника	Номинальный диаметр отверстия d , мм	Диаметр наружный D , мм	Диаметр шарика D_w , мм	Сумма главных кривизн $\Sigma\rho$	Максимальная нагрузка на шарик P_0 , Н	Максимальное контактное напряжение $\sigma_{\max}$, МПа	Число тел качения z
66311	55	120	20,64	0,12963	43729	4922	8
310	50	110	19,05	0,14086	33571	4762	8
317	85	180	30,16	0,0779	72247	4486	8
46416	80	200	38,1	0,07365	121941	4757	7

Таблица 3

Параметры роликоподшипников центробежных насосных агрегатов

Тип	Номинальный диаметр отверстия d , мм	Диаметр наружный D , мм	Диаметр ролика D_w , мм	Сумма главных кривизн $\Sigma\rho$	Максимальная нагрузка на шарик P_0 , Н	Максимальное контактное напряжение $\sigma_{\max}$, МПа	Число тел качения z
2204	20	47	6,5	0,344729	5498	3207	11
2408	40	110	17	0,134888	36205	3215	11
2412	60	150	22	0,102957	56000	3106	12
2419	95	240	34	0,066314	134653	3103	13
32317	85	180	24	0,092550	60571	2969	14

$$\eta = 2(1 - \mu^2) / E, \quad (4)$$

где μ — коэффициент Пуассона, $\mu = 0,3$; E — модуль упругости, $E = 21,08 \cdot 10^4$ для стали ШХ-15.

Величина η по формуле (4) $\eta = 0,863 \cdot 10^{-5}$ мм²/Н.

В табл. 2 представлены результаты расчетов для шарикоподшипников центробежных насосных агрегатов.

При вычислении максимальной нагрузки P_0 на шарик общая вертикальная нагрузка Q на подшипник принимается равной динамической грузоподъемности $Q = C$

$$P_0 = \frac{Q}{\kappa(P_0)}, \quad (5)$$

где Q — общая вертикальная нагрузка на подшипник; $\kappa(P_0)$ — геометрическая характеристика шарикоподшипника, определяемая по выражению

$$\begin{aligned} \kappa(P_0) = & 1 + 2[\cos^{5/2} \gamma + \cos^{5/2} 2\gamma + \\ & + \cos^{5/2} 3\gamma + \cos^{5/2} 4\gamma + \cos^{5/2} 5\gamma + \\ & + \cos^{5/2} 6\gamma + \cos^{5/2} 7\gamma + \cos^{5/2} 8\gamma + \cos^{5/2} 9\gamma], \text{ где } \gamma = 2\pi/z. \end{aligned} \quad (6)$$

В табл. 3 представлены результаты вычисления параметров роликоподшипников центробежных насосных агрегатов.

При вычислении параметров для роликоподшипников принимали кривизну (рис. 1)

$$\rho_{11} = \frac{1}{r_{11}} = \frac{1}{\infty} = 0; \quad \rho_{12} = \frac{1}{r_{12}} = \frac{2}{D_w};$$

$$\rho_{21} = -\frac{1}{r_{21}} = -\frac{1}{\infty} = 0; \quad \rho_{22} = \frac{2}{d_1}. \quad (7)$$

В соответствии со стандартом [4] в качестве расчетных контактных напряжений для подшипников приняты допустимые напряжения: радиальные и радиально-упорные шарикоподшипники $[\sigma]_H = 4200$ МПа; радиальные шариковые самоустанавливающиеся подшипники $[\sigma]_H = 4600$ МПа; роликовые радиальные и радиально-упорные $[\sigma]_H = 4000$ МПа.

Принимая общую вертикальную нагрузку Q на подшипники равной динамической грузоподъемности $Q = C$, получены напряжения в контакте для шарикоподшипников выше допустимых напряжений, что свидетельствует о необходимости корректировки расчетной вертикальной нагрузки Q при проектировании опор (табл. 2).

Радиальные зазоры для подшипников качения являются важной технико-эксплуатационной характеристикой. Радиальный зазор G_r определяется как величина перемещения внутреннего кольца в радиальном направлении из одного крайнего положения в другое (рис. 2)

$$G_r = D_1 - d_1 - 2D_w, \quad (8)$$

где D_1 , d_1 — диаметры дорожек качения наружного и внутреннего колец.

ГОСТ 24810 предусмотрены группы радиальных зазоров для разных подшипников.

На рис. 3 представлены для примера зависимости радиальных зазоров G_r для подшипников качения.

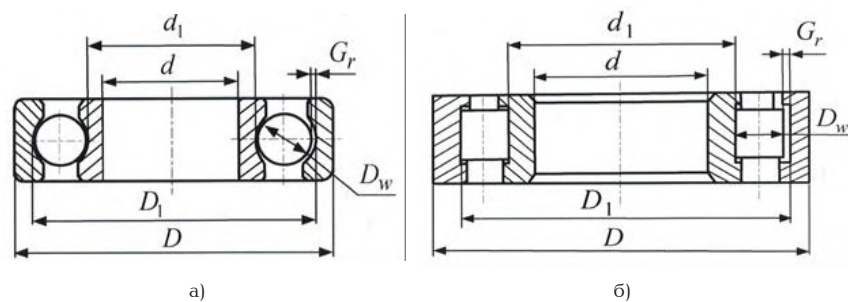


Рис. 2. Параметры подшипников при измерении радиального зазора G_r : а) шарикоподшипник; б) роликоподшипник

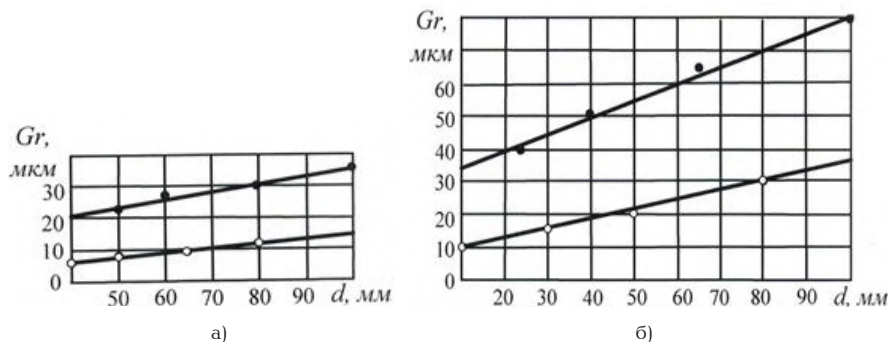


Рис. 3. Зависимость радиального зазора G_r от внутреннего диаметра подшипника d : а) шарикоподшипник; б) роликоподшипник

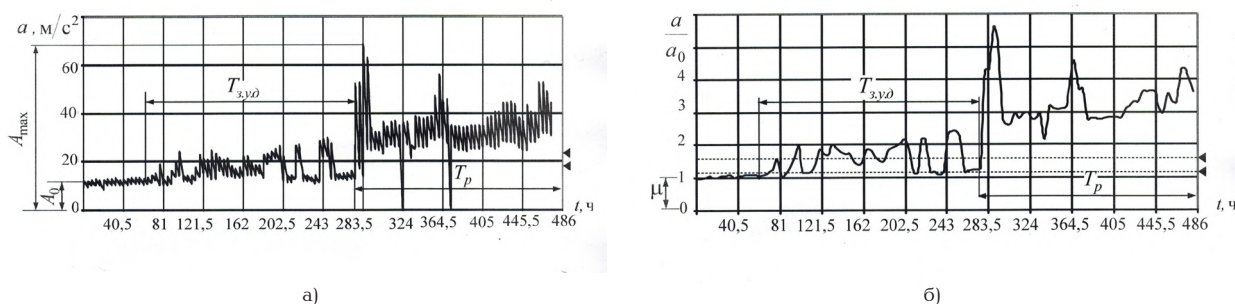


Рис. 4. Тренд зарождения усталостных дефектов и разрушения подшипника центробежного насосного агрегата (N=75 кВт, n=3000 об/мин): а) тренд виброускорения; б) безразмерный тренд виброускорения

В табл. 4 для десяти подшипников насосных агрегатов показаны диапазоны изменения радиальных зазоров G_r (мкм): для нормальных групп подшипников столбец 5 и для предельных групп подшипников столбец 6. Строки 6, 7, 8 относятся к роликоподшипникам.

Для указанных подшипников проведены замеры виброускорения в радиальном направлении относительно оси вала, при существующих радиальных зазорах в подшипниках, которые представлены в табл. 4 (столбец 9). Принимается гипотеза о том, что радиальный зазор G_r в подшипнике соответствует начальному значению эксцентриситета вращения ротора электродвигателя или вала центробежного насоса. Согласно этой гипотезе виброускорение в радиальном направлении определяется по формуле

$$a = \omega^2 G_r = \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 G_r. \quad (9)$$

В табл. 4 показаны расчетные диапазоны ускорения, соответствующие радиальным зазорам G_r для представленных подшипников. Столбец 7 содержит ускорения, полученные по формуле (9) для радиальных зазоров G_r , взятых из столбцов 5 и 6.

Проведены широкомасштабные экспериментальные исследования центробежных насосных агрегатов с применением системы автоматической диагностики и мониторинга состояния оборудования КОМПАКС® [6].

На рис. 4 показан процесс изменения виброускорения центробежного насосного агрегата, предшествующий полному усталостному разрушению подшипника качения насосного агрегата. Процесс деградации разделяется на два последовательных участка: $T_{з.у.г}$ — зона усталостной деградации (ч); T_p — зона разрушения (ч).

Зона усталостной деградации $T_{з.у.г}$ характеризуется устойчивым повышением виброускорения в 1,5–2 раза для исследуемого агрегата, и этот процесс сопровождается наличием выбросов

Таблица 4

Радиальные зазоры и центробежные ускорения вибрации валов насосных агрегатов при частоте вращения электродвигателя $n=3000$ об./мин

№	Идентификатор	Тип подшипника	Номинальный диаметр отверстия d , мм	Число тел качения z	Радиальные зазоры		Радиальное виброускорение		Зазор по формуле (10) G_r , мкм
					Номинальная группа $G_{\min} - G_{\max}'$, мкм	Пределная группа $G_{\min} - G_{\max}'$, мкм	Расчетное по формуле (8) $\frac{a_{\min}}{a_{\max}}$, м/с ²	Экспериментальное a , м/с ²	
1	Насос KRG1H-80.315.25-001	2	3	4	5	6	7	8	9
							2,764	5,53	
2	Насос НПС 200/700	66311	55	15	8–28	55–90	8,883		56
							3,553	10,4	
3	Насос НПС 65/35-500	46416	80	7	12–36	75–120	11,844		105
							2,270	5,55	
4	Насос НПС 200/700	310	50	8	6–23	45–73	7,205		56,2
							2,961	11,69	
5	Э/А ВА02-315-M2	46416	80	7	10–30	65–105	10,363		118
							3,553	1,85	
6	Э/А ВА02-315-M2	317	85	8	12–36	75–120	11,844		18,7
							5,922	20	
7	Э/А ВА0-2-315-M2	32317	85	14	10–60	145–195	19,246		203
							5,922	15,65	
8	Э/А ВА0-500L-2	32320	100	14	10–60	145–195	19,246		158
							6,415	8,71	
9	Э/А ВА0-2-280-2	317	85	8	12–36	75–120	3,553		62
							11,844	6,07	
10	Э/А 2B-2505-2Y2.5	317	85	8	12–36	75–120	3,553		116
							11,844	11,43	

виброускорения в течение периода времени $t = T_{з.у.г} = 240$ (ч).

Процесс разрушения подшипника начинается с появления выброса виброускорения. Критические ударные ускорения $A_{\max} = (3 \div 6)A_0$ свидетельствуют о необратимых разрушениях механических связей деталей и узлов центробежного насосного агрегата, которые приводят к полной потере работоспособности в течение $T_p = 246$ (ч).

С помощью системы автоматической диагностики и мониторинга состояния оборудования КОМПАКС® [6] получены тренды вибрационного состояния насосов, характеризующие период зарождения дефектов центробежных насосных агрегатов. На рис. 4 показаны: а) тренд изменения виброускорения во время эксплуатации агрегата; б) безразмерный тренд виброускорения $\mu = A/A_0$, где A — текущее значение виброускорения; A_0 — начальное базовое значение виброускорения.

Экспериментальные значения виброускорений приведены в табл. 4, столбец 8. Выполнены сравнения расчетных и экспериментальных значений ускорений (столбцы 7 и 8). Для насоса KRG1H-80.315.25-001 (строка 1) экспериментальные значения ускорения $a = 5,53$ м/с² находятся внутри расчетного диапазона в столбце 7. Аналогично для агрегатов (строка: 2, 3, 7, 8, 9, 10) экспериментальные значения виброускорений для подшипников насосов и двигателей находятся внутри рассмотренного диапазона ускорений насосного агрегата. В строке 4 экспериментальное виброускорение $a = 11,69$ м/с² превышает предельное расчетное значение $a = 10,363$ м/с². В строке 5 экспериментальное значение виброускорения $a = 1,85$ м/с² меньше нижнего расчетного значения ускорения.

Таким образом, по данным табл. 4 видно, что экспериментальные значения виброускорений насосного агрегата имеют достаточно большой разброс, что объясняется большим разбросом зазоров в подшипниках качения, выпускаемых заводами-изготовителями [4]. Экспериментальные значения виброускорения насосов и электродвигателей можно использовать для определения технического состояния этих объектов по величине зазора, вычисленного по формуле

$$G_{r,z} = \frac{a}{\omega^2} = \frac{a}{(\pi n/30)^2}. \quad (10)$$

В табл. 4, столбец 9 приведены значения зазоров G_r , которые позволяют отнести полученные зазоры к соответствующей группе зазоров подшипника качения по нормам [4].

Из рис. 4 видно, что разрушение подшипника сопровождается увеличением начального виброускорения насосного агрегата в несколько раз.

Библиографический список

1. Ломакин, А. А. Центробежные и осевые насосы / А. А. Ломакин. — М. — Л. : Машиностроение, 1966. — 260 с.
2. Быстрицкий, Г. Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий : уч. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г. Ф. Быстрицкий. — М. : Издат. центр «Академия», 2008. — 304 с.
3. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. — М. : Машиностроение, 1977. — 288 с.
4. Черменский, О. Н. Подшипники качения : справ.-кат. / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. — М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.
5. Детали машин : учеб. для вузов. В 8 т. / Л. А. Андриенко [и др.] ; под ред. О. А. Ряховского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — Т.8. — 520 с.
6. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко; М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО «Омский гос. тех. ун-т»; НППЦ «Динамика». — 2-е изд., с уточн. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. — 378 с.

БОЯРКИНА Ирина Владимировна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры механики Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), г. Омск.

Адрес для переписки: iriboyarkina@yandex.ru

ТАРАСОВ Евгений Владимирович, начальник отдела ООО «Научно-производственный центр «Динамика, надежность машин и комплексная автоматизация» — НППЦ «Динамика», г. Омск, лауреат премии Правительства РФ.

Адрес для переписки: tarasov_omsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.04.2016 г.

© И. В. Бояркина, Е. В. Тарасов

Книжная полка

621.791/М74

Мозговой, И. В. Сварка полиэтилена : моногр. / И. В. Мозговой. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 267 с.

Представлена технология сварки изделий из полиэтилена с использованием преимущественно энергии силового ультразвука для выполнения упаковки продуктов питания в космосе и технология сварки полиэтиленовых пленочных вкладышей в сухотарные бочки для расфасовки рыбной продукции. Сформулированы научные положения, раскрывающие механизм образования соединений при ультразвуковой сварке полиэтилена, а также преимущества и недостатки этого способа. Рекомендована специалистам, исследователям, аспирантам и студентам, занимающимся вопросами переработки пластмасс в изделия путем сварки.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОПНЕВМОУДАРНИКОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Создание новых, перспективных гидропневматических ударных устройств, обеспечивающих эффективную работу гидроимпульсных средств механизации, является актуальной задачей. Цель исследования — совершенствование математического моделирования энергетических показателей гидропневматических ударных устройств. Задачами исследования является выявление влияния конструктивных параметров гидропневмоударников на их энергетические показатели. Методика исследований включает применение методов имитационного моделирования на ЭВМ. Установлено, что энергетические показатели (энергия, мощность единичного удара) гидропневматических ударных устройств зависят от скорости бояка и таких его конструктивных параметров, как масса, величина хода бояка, давление зарядки газа пневмоаккумулятора. Представлены функциональные зависимости скорости, энергии удара от массы, величины хода бояка, давления зарядки газа пневмоаккумулятора. Найденные функциональные зависимости позволяют разработать алгоритмы и инженерную методику автоматизированного моделирования и расчета гидропневматических ударных устройств, что позволит сократить сроки их проектирования.

Ключевые слова: гидропневмоударник, скорость бояка, энергия удара.

Гидравлическая импульсная система включает следующие основные функциональные элементы: источник питания (насос) базовой машины и гидроударное устройство, состоящее из энергетического блока, блока управления рабочим циклом и инструмента. В гидравлическом ударном устройстве энергия подводимой жидкости генерируется в импульсы силы определенной частоты и интенсивности, воздействующие на обрабатываемую среду.

Применение гидравлической импульсной техники позволяет выполнять разрушение и разработку мерзлого грунта, скальных пород и полотно дорог, проходку скважин в грунте, забивание и извлечение свайных элементов, уплотнение грунта [1–6].

Эффективность использования гидравлической импульсной системы зависит от большого числа факторов и свойств системы [3, 6]. Блок-схема рабочего процесса гидравлической импульсной системы представлена на рис. 1.

Из гидравлических ударных устройств гидропневматические ударные устройства получили наибольшее распространение. Преимущества гидропневматических ударных устройств заключаются в компактности, низкой металлоемкости на единицу энергии удара, простоте регулирования энергии

удара изменением давления зарядки газа в пневмоаккумуляторе [1, 2, 5].

Схема гидропневматического ударного устройства показана на рис. 2.

К основным конструктивным параметрам гидропневматического ударного устройства относятся:

- масса бояка (подвижных частей);
- ход бояка;
- давление зарядки газа пневмоаккумулятора;
- диаметр поршня пневмоаккумуляторной камеры;
- диаметры поршней взводящей, сливной камер;
- диаметр хвостовика инструмента;
- длина гидроударного устройства.

Такие конструктивные параметры гидроударного устройства, как давление зарядки газа, масса бояка, величина хода бояка, существенно образом влияют на скорость удара, от которой зависит энергия единичного удара.

Разработка полных математических моделей гидравлических импульсных систем базируется на представлении их в виде технических систем, состоящих из двух видов физических подсистем: механической и гидравлической.

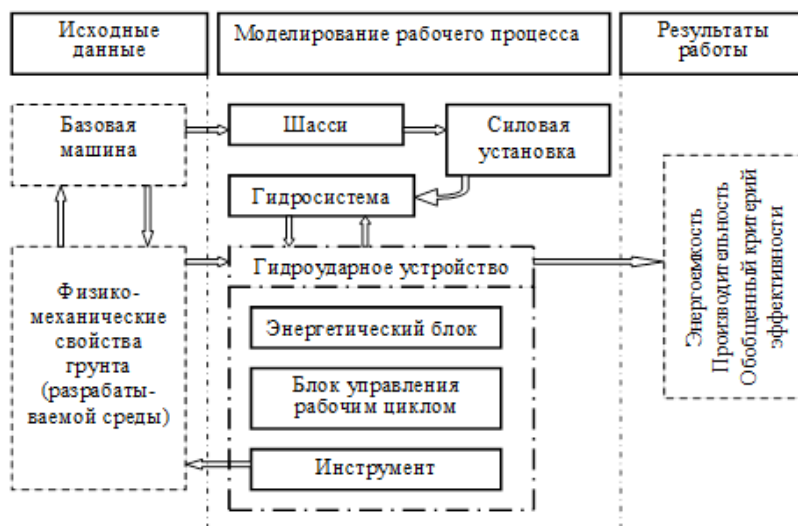


Рис. 1. Блок-схема рабочего процесса гидравлической импульсной системы

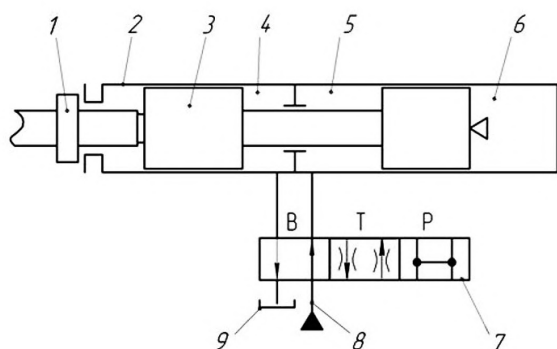


Рис. 2. Схема гидропневматического ударного устройства:

- 1 — инструмент; 2 — корпус; 3 — боек;
- 4 — камера низкого давления;
- 5 — камера высокого давления;
- 6 — пневмоаккумуляторная камера;
- 7 — орган управления рабочим циклом;
- 8 — напорная гидролиния; 9 — гидробак;
- В — взвод бойка; Т — торможение;
- Р — разгон (рабочий ход)

В зависимости от решаемых задач число элементов механической подсистемы может принимать различные значения и определяется в основном числом учитываемых при моделировании подвижных масс гидравлических импульсных систем (бойк, корпус гидроударного устройства, запорно-регулирующие элементы блока управления рабочим циклом, гидрораспределителя, пружины и другие).

Количество гидравлических подсистем определяется особенностями конструктивных решений гидроударного устройства: конструкцией взводящей и сливной камер (полостей) гидроударника.

Математическая модель гидропневматического ударного устройства включает основные конструктивные параметры гидроударника, его элементы, параметры гидропривода базовой машины, описывает характерные периоды работы устройства (взвод, торможение, рабочий ход) [1–3, 5, 6].

Математическая модель гидроударного устройства записывается в виде системы уравнений, включающей уравнение движения бойка в виде

основного уравнения динамики; уравнений расходов, учитывающих условия неразрывности потока рабочей жидкости; уравнений связи между параметрами потока.

При создании гидравлических импульсных систем необходимо рассматривать большое число вариантов структур, параметров и изменять, уточнять математическую модель.

В общем виде система уравнений движения i -го подвижного элемента гидропневматического ударного устройства в дифференциальной форме может быть представлена уравнениями динамики следующего вида:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{oi} - F_{ci}, \quad (1)$$

где x_i — перемещение подвижного элемента;

m_i — масса подвижного элемента;

F_{oi} — движущие силы;

F_{ci} — силы сопротивления;

t — время.

Движущие силы зависят от величин давлений, действующих в полостях гидроударного устройства, и эффективных площадей полостей. Силы сопротивления учитывают силы механического трения, вязкого трения, силы противодействия, силы гидравлического сопротивления, возникающие при вытеснении жидкости из полостей при работе гидроударного устройства и другие. При рассмотрении движения инструмента гидроударного устройства учитываются силы сопротивления со стороны разрабатываемого грунта.

Разработано программное обеспечение для проведения динамического расчета гидропневматического ударного устройства. Программное обеспечение является основой программного-имитационного комплекса моделирования гидроударных рабочих органов дорожно-строительных машин и позволяет определять основные параметры гидропневматических ударных устройств в зависимости от давления зарядки газа пневмоаккумулятора, массы бойка, геометрических параметров гидроударника, длин гидролиний, свойств рабочей жидкости и других характеристик.

Для исследования математической модели гидропневматического ударного устройства при-

менялось планирование вычислительного эксперимента.

Тщательный анализ информации о параметрах гидропневматического ударного устройства показал, что факторами, в значительной степени влияющими на энергетические характеристики гидроударного устройства, являются:

- масса бойка m , кг (фактор x_1);
- давление зарядки газа в пневмоаккумуляторе $p_{г0}$, МПа (фактор x_2);
- ход бойка ℓ , мм (фактор x_3).

За функцию отклика, характеризующую работу гидропневматического ударного устройства, принимаем скорость подвижных частей в момент удара V_1 .

В результате вычислительного эксперимента получено следующее уравнение регрессии

$$V_1 = 9,121 - 2,694x_1 + 1,601x_2 + 1,646x_3 - 0,889x_1x_2 - 0,734x_1x_3 + 0,071x_2x_3 - 0,344x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Полученное уравнение является функцией трех факторов. Оно позволяет выявить качественный и количественный характер изменения скорости удара гидроударника от влияющих факторов.

Величина коэффициента регрессии — количественная мера влияния фактора. О характере влияния факторов говорят знаки коэффициентов.

Из уравнения регрессии (2) видно, что наибольшее влияние на скорость удара V_1 оказывают масса бойка, ход бойка и давление зарядки газа в пневмоаккумуляторе. При этом с увеличением массы бойка скорость удара уменьшается, а с увеличением хода и давления зарядки газа в пневмоаккумуляторе скорость удара увеличивается. На скорость удара оказывают влияние также эффекты взаимодействия факторов, составляющих нелинейную часть уравнения.

Уравнение регрессии (2) в натуральных значениях факторов имеет вид

$$V_1 = 2,412 - 0,0171m + 1,102p_{г0} + 0,0486\ell + 0,0028mp_{г0} + 0,000098m\ell + 0,03034p_{г0}\ell - 0,00027mp_{г0}\ell. \quad (3)$$

Частные случаи исследования поверхности отклика представлены на рис. 3–4 в виде трехмерных графиков, позволяющих наиболее полно проиллюстрировать влияние исследуемых факторов на функцию отклика — скорость удара (зависимости скорости удара от массы бойка, хода бойка и давления зарядки газа пневмоаккумулятора).

Из приведенных графических зависимостей (рис. 3–4) видно, что скорость удара может изменяться в широком диапазоне от 4,5 до 16 м/с в зависимости от массы бойка, давления зарядки газа пневмоаккумулятора и величины хода бойка.

Зная скорость удара, найдем энергию единичного удара по формуле

$$T = (2,412 - 0,0171m + 1,102p_{г0} + 0,0486\ell + 0,0028mp_{г0} + 0,000098m\ell + 0,03034p_{г0}\ell - 0,00027mp_{г0}\ell)^2 m / 2. \quad (4)$$

Эффективная (ударная) мощность гидропневматического ударного устройства определяется из выражения $N_{yg} = T \cdot f$, здесь f — частота ударов.

На рис. 5 представлены результаты расчетов энергии единичного удара в виде трехмерных графиков.

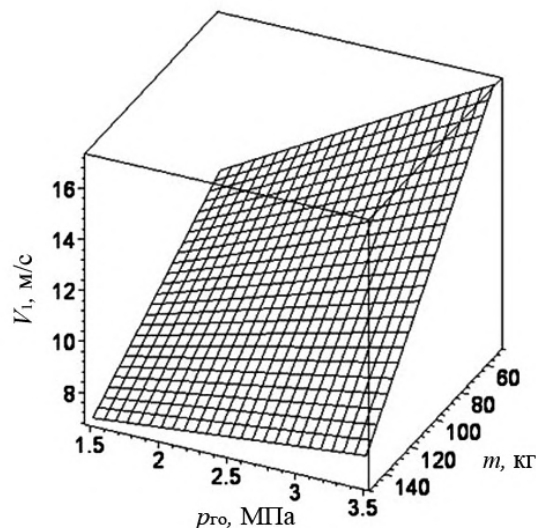


Рис. 3. Зависимость скорости удара V_1 от массы бойка m и давления зарядки газа пневмоаккумулятора $p_{г0}$ (ход бойка $\ell = 100$ мм)

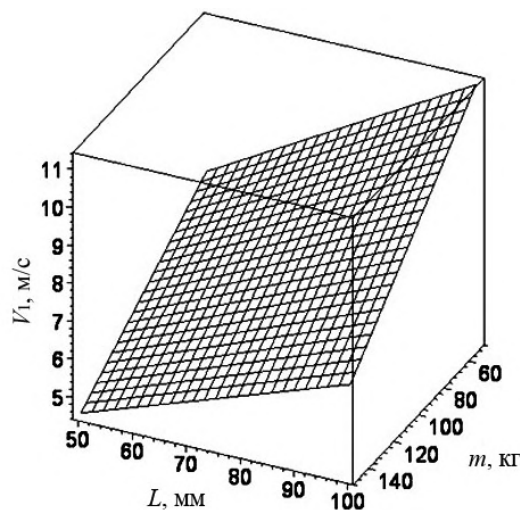


Рис. 4. Зависимость скорости удара V_1 от массы бойка m и величины хода бойка L (ℓ) (давление зарядки газа пневмоаккумулятора $p_{г0} = 1,5$ МПа)

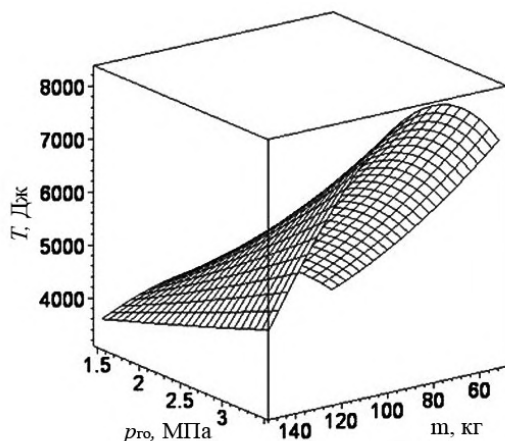


Рис. 5. Зависимость энергии удара T от массы бойка m и давления зарядки газа пневмоаккумулятора $p_{г0}$ (ход бойка $\ell = 100$ мм)

Полученные уравнения (3) – (4) позволяют определять энергетические параметры гидропневматического ударного устройства, полнее выявить его возможности, сократив время и средства на проведение вычислительных экспериментов.

Исследование математической модели гидропневматического ударного устройства позволило получить зависимости энергии единичного удара, скорости удара от массы бойка, хода бойка и давления зарядки газа пневмоаккумулятора.

Из приведенных графических зависимостей (рис. 3–5) видно, что энергия единичного удара и скорость удара гидропневматического ударного устройства может изменяться в широком диапазоне (1500–8000 Дж — для энергии удара, от 4,5 до 16 м/с — для скорости удара) в зависимости от массы бойка, давления зарядки газа пневмоаккумулятора и величины хода бойка.

Выводы. Существенным фактором, влияющим на эффективность работы гидропневматического ударного устройства, является энергия единичного удара, которая зависит от массы подвижных частей и скорости подвижных частей в момент удара. Широкий диапазон изменения скорости удара (от 4,5 до 11 м/с), энергии единичного удара (от 1500 до 8000 Дж) позволяет использовать гидропневматическое ударное устройство в качестве различных видов сменных рабочих органов (гидромоты, гидротрамбовки) дорожно-строительных машин, в частности экскаваторов.

Библиографический список

1. Алимов, О. Д. Гидравлические виброударные системы / О. Д. Алимов, С. А. Басов. — М.: Наука, 1990. — 352 с.

2. Галдин, Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин : моногр. / Н. С. Галдин. — Омск : Изд-во СибАДИ, 2005. — 223 с.

3. Галдин, Н. С. Оптимизационный синтез основных параметров гидравлических импульсных систем строительных машин / Н. С. Галдин, В. Н. Галдин, Н. Н. Егорова // Вестник СибАДИ. — 2013. — № 6 (34). — С. 73–78.

4. Готов, Б. Н. Научные основы создания гидравлических ручных машин ударного действия : автореф. ... дис. д-ра техн. наук / Б. Н. Готов. — Караганда, 2010. — 40 с.

5. Теоретические основы создания гидроимпульсных систем ударных органов машин / А. С. Сагинов [и др.]. — Алма-Ата : Наука, 1985. — 256 с.

6. Щербаков, В. С. Моделирование гидравлических импульсных систем / В. С. Щербаков, В. Н. Галдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2010. — Т. 6, № 5. — С. 121–124.

ГАЛДИН Николай Семенович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой подъемно-транспортных, тяговых машин и гидропривода.

Адрес для переписки: galdin_ns@sibadi.org

ГАЛДИН Владимир Николаевич, соискатель по кафедре автоматизации производственных процессов и электротехники.

Адрес для переписки: galdin_ns@sibadi.org

Статья поступила в редакцию 27.05.2016 г.

© Н. С. Галдин, В. Н. Галдин

Книжная полка

621.791/М74

Мозговой, И. В. ИК-ультразвуковая сварка полиамида : моногр. / И. В. Мозговой, С. Б. Березнев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 269 с.

Рассмотрены вопросы теории и технологии ИК-ультразвуковой сварки ответственных изделий из полиамидов с использованием энергии силового ультразвука и энергии инфракрасного излучения. Выполнялась сварка встык уплотнителей диаметром 1300 мм из полиамидов ПА-6, ПА-610 и сополимера АУ 80/20, имеющих V-образное сечение, и полиамидных труб диаметром от 10 до 30 мм с толщиной стенки до 6 мм. Разработанные технология и оборудование для сварки включены в производственный процесс изготовления гидравлических устройств усилием 30 000 тонн. Рекомендована специалистам, занимающимся переработкой полимерных материалов в изделия, а также научным работникам, аспирантам и студентам.

Бишутин, С. Технология машиностроения : учеб. и практикум / С. Бишутин [и др.] ; под. ред. А. Тотая. — М. : Юрайт, 2016. — 240 с. — ISBN 978-5-9916-5434-0.

В учебнике представлены все основные разделы курса, обеспечивающие подготовку обучающихся к освоению отраслевых технологий обрабатывающих производств. Даны понятия и определения производственного процесса и характеристика машиностроительного производства, принципы проектирования технологических процессов сборки и их размерно-точностной анализ. Изложены теория базирования заготовок и причины возникновения погрешностей при обработке заготовок. Выделены основные направления технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин и способы улучшения их эксплуатационных свойств. Описаны вопросы проектирования процессов обработки для различных типов производств, способы их нормирования и оценки себестоимости изготовления продукции. Рассмотрены конкретные примеры расчетов, сформулированы задачи для самостоятельного решения и контрольные вопросы.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по направлениям: «Автоматизация технологических процессов и производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Энергетическое машиностроение», «Техносферная безопасность», «Управление качеством».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ИЗ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СМЕСЕЙ

Экспериментально определены прочностные свойства песчано-смоляных форм, полученных в условиях одновременного термического воздействия и статической нагрузки. Показано, что увеличение давления на смесь на 0,03...0,05 МПа в процессе формообразования повышает прочность форм, снижает шероховатость поверхности отливки.

Ключевые слова: отливки, формы, прочность, газопроницаемость, смесь, смола.

Выбор эффективных направлений технического перевооружения связан с проведением анализа технико-экономического уровня производства, определением круга точных показателей, характеризующих процесс получения отливок. Формирование эффективных направлений технического перевооружения литейного производства включает выбор необходимых для внедрения образцов новой техники, прогрессивной технологии и соответствующей им формы организации производства.

В настоящее время отливки, получаемые литьем в песчано-глинистые формы, характеризуются большим количеством различных видов брака [1]. Использование металла в литейном производстве характеризуется величиной выхода годного. Повышение точности литых заготовок снижает расход металла, приходящегося на единицу продукции, а также позволяет снизить затраты на механическую обработку заготовок.

Этому в полной мере соответствует изготовление отливок в песчано-смоляных формах. При этом основным недостатком смесей является высокая стоимость связующего [2]. Снижению содержания связующего в смеси способствует приложение давления на смесь при ее формообразовании в процессе нагрева [3].

Для изготовления оболочковых форм из песчано-смоляной смеси изготовлена экспериментальная установка на базе формовочного полуавтомата модели 51713 и состоящая из бункера, в который засыпается песчано-смоляная смесь, печи, плиты для дополнительного статического приложения нагрузки, стола, на котором установлена электронагреваемая модельная плита с моделью и наполнительной рамкой размерами 800×600×100 мм (рис. 1). На модельную плиту, на обратной стороне которой имелись пружинные толкатели (для того, чтобы готовую оболочковую полуформу отделить от моде-

ли) и электронагревательные приборы, устанавливали модели отливок горношахтного оборудования («Направляющая», «Лапа», «Лыжа»). Там же располагался термодатчик, с помощью которого контролировался нагрев плиты до 240 ... 260 °С. На модельную плиту с моделями отливок устанавливали опоку высотой 100 мм и по периметру совпадающую с бункером со смесью. В исходном положении модельная плита с моделями накрыта корпусом сушильной печи. Рядом располагался бункер, в который засыпали механическую смесь кварцевого песка с пульвербакелитом. Перед работой машины модельную плиту покрывали разделительным составом, который состоит из смеси воды — 100 %, диметилполисилоксана — 8 %, мыла хозяйственного — 3 %. При нанесении на модель, разогретую до 250 °С, разделительная смесь образует твердую и тонкую, но жаростойкую плёнку, которая сохраняется после нескольких съёмов оболочек с моделей. При включении формовочной машины печь поднималась вверх, а из бункера на модельную плиту происходит засыпка смеси. При этом на наполнительную рамку с насыпанной смесью опускалась плита, оказывая статическую нагрузку на смесь. Затем плита возвращалась в исходное состояние.

Под действием тепла модельной оснастки пульвербакелит в слое смеси, непосредственно прилегающей к модельной плите, плавится и смачивает зёрна песка. После формирования оболочки модельная плита возвращается в исходное положение, а модельная плита с образовавшейся оболочкой накрывается печью, внутри которой температура достигает 350 °С. Толщина оболочки при этом составляет 10 ... 15 мм.

Образцы для испытания на прочность изготавливались по технологическому процессу, в точности соответствующему процессу изготовления оболочковых форм для отливок горношахтного оборудо-

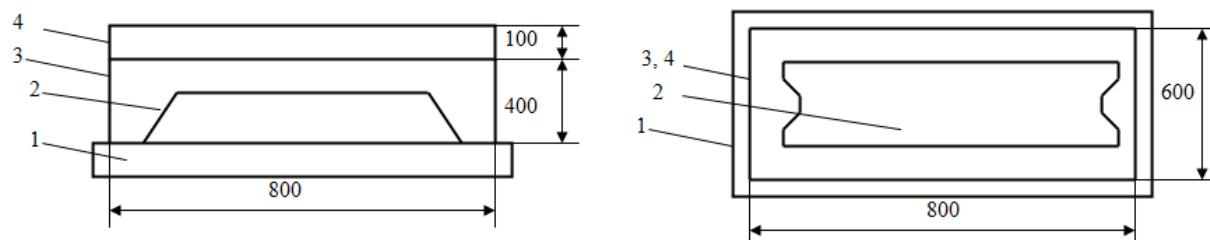


Рис. 1. Схема установки модельно-опочной оснастки:
1 — нагреваемая модель; 2 — модель отливки; 3 — опока; 4 — наполнительная рамка

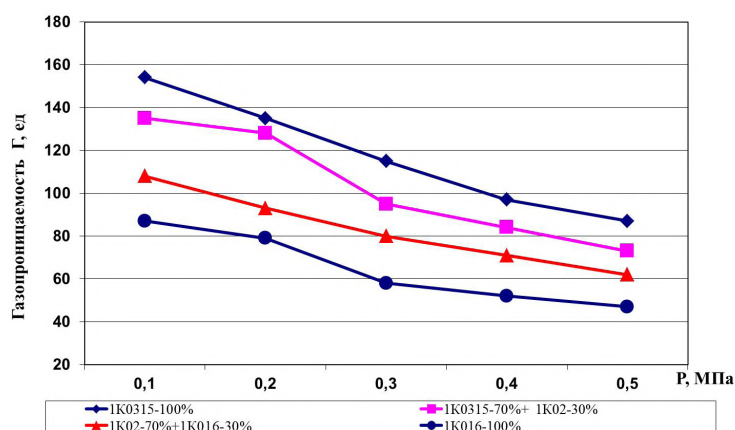


Рис. 2. Зависимость газопроницаемости формы от величины прикладываемой нагрузки на ПСС и фракции песка

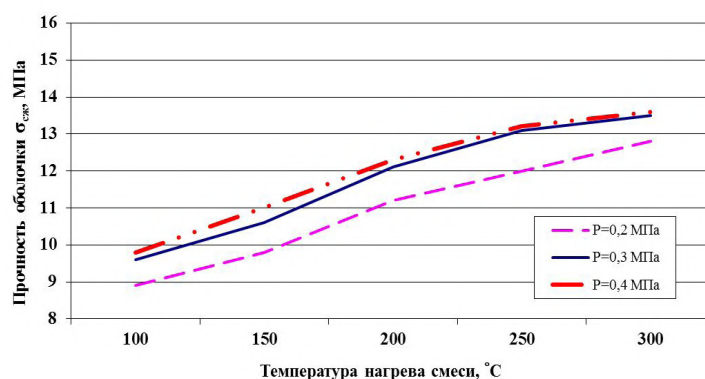


Рис. 3. Зависимость прочности оболочки на сжатие от температуры нагрева в процессе формообразования при различных нагрузках

вания. Толщина образцов h зависела от толщины предварительной засыпки песчано-смоляной смеси, времени выдержки на плите, величины давления, степени нагрева модельной плиты. Показателем прочности считали среднее арифметическое полученных результатов. Если данные одного образца отличались от среднего арифметического более чем на 10 %, то испытания повторялись.

Определяли зависимость газопроницаемости формы от величины давления, прикладываемого в процессе твердения литейной формы. Для проверки газопроницаемости печанно-смоляной смеси (ПСС) применяли общеизвестную методику испытания песчано-глинистых смесей [4]. Испытывали образцы диаметром 10 мм, которые изготавливали с помощью копра в гильзе. Также в смеси использовали разных фракционный состав песка. Исследования

показали, что кварцевый песок в соотношении марок 1K0315—70 % + 1K02—30 % в большей степени соответствует величине технологической газопроницаемости (90—100 ед.) (рис. 2, табл. 1). К тому же эксперименты показали, что оптимальным является давление на смесь 0,2...0,25 МПа, при повышении которого наблюдается плотная укладка зёрен песка для всех испытываемых составов песков.

Экспериментальное определение зависимости прочности оболочки от температуры нагрева модельной плиты показало, что с увеличением температуры нагрева модельной плиты прочность оболочки повышается. Вместе с тем следует отметить, что повышение температуры нагрева свыше 300 °C приводит к выгоранию связующего и, следовательно, к разупрочнению формы. Поэтому рациональной температурой нагрева выбрана 250 °C. Состав

Таблица 1

Зависимость газопроницаемости формы от величины прилагаемой нагрузки на ПСС и фракции песка

Газопроницаемость Г, ед.	Давление Р, МПа	Соотношение фракций песка
154	0,1	1K0315 – 100 %
135	0,2	
115	0,3	
97	0,4	
87	0,5	
135	0,1	1K0315 – 70 % + + 1K02 – 30 %
128	0,2	
95	0,3	
84	0,4	
73	0,5	
108	0,1	1K02 – 70 % + + 1K016 – 30 %
93	0,2	
80	0,3	
71	0,4	
62	0,5	
87	0,1	1K016 – 100 %
79	0,2	
58	0,3	
52	0,4	
47	0,5	

смеси: песок 1K02 – 30 % + 1K0315 – 70 %, связующее (пульвербакелит) — 5 %. Продолжительность выдержки смеси на плите для формирования оболочки — 30 секунд. Данные этой серии экспериментов отражены на графике (рис. 3) и в табл. 2.

Экспериментальное изучение зависимости прочности оболочек от времени выдержки на модельной плите при различных величинах давления на смесь показали, что увеличение продолжительности выдержки смеси на плите повышает прочность. Данные этой серии экспериментов представлены на графике (рис. 4) и в табл. 3.

В другой серии экспериментов исследовалось влияние целесообразности увеличения давления на смесь в процессе формообразования. Определено, что при увеличении давления в процессе формообразования на 0,03...0,05 МПа относительно начального давления (0,25 МПа) снижается шероховатость оболочек, при этом газопроницаемость остается в пределах 90...100 единиц. При дальнейшем увеличении давления наблюдается снижение газопроницаемости менее 100 ед. и некоторое увеличение шероховатости, что обусловлено выдавливанием

Таблица 2

Зависимость прочности оболочки на сжатие от температуры нагрева в процессе формообразования при различных нагрузках

№	Температура нагрева смеси, °С	Давление Р, МПа	Прочность оболочки, $\sigma_{сж}$, МПа
1	100	0,2	8,9
2	150		9,8
3	200		11,2
4	250		12,0
5	300		12,8
6	100	0,3	9,6
7	150		10,6
8	200		12,1
9	250		13,1
10	300		13,5
11	100	0,4	9,8
12	150		11,0
13	200		12,3
14	250		13,2
15	300		13,6

Таблица 3

Зависимость прочности оболочки на сжатие от времени выдержки смеси на модели в процессе формообразования при различных нагрузках

№	Время выдержки смеси на модели, с	Давление на смесь Р, МПа	Прочность полученной оболочки $\sigma_{сж}$, МПа
1	10	0,2	7,5
2	20		10,1
3	30		12,0
4	40		12,5
5	50		12,9
6	10	0,3	8,3
7	20		10,9
8	30		13,1
9	40		13,6
10	50		14,1

зёрен в уже образующейся оболочке. В табл. 4 приведены экспериментальные данные по определению оптимального давления на смесь. График зависимости шероховатости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки

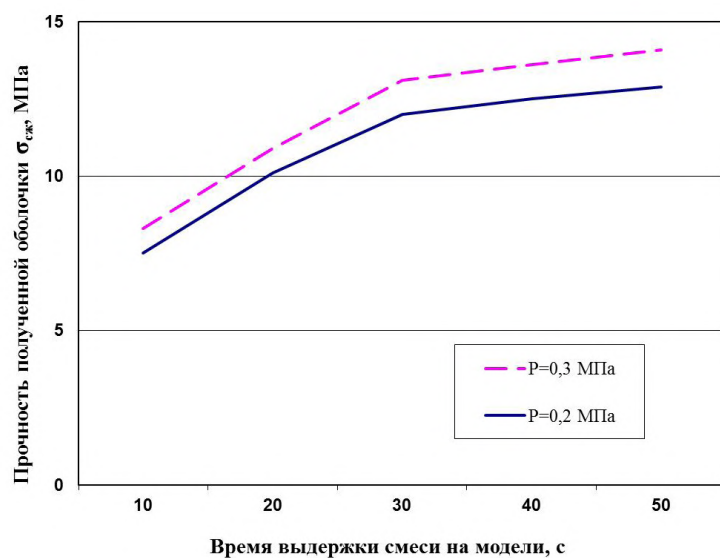


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие от времени выдержки смеси на модели в процессе формообразования при различных нагрузках

Таблица 4

Зависимость прочности и газопроницаемости оболочки от давления на смесь в процессе формирования оболочки

№ опыта	Изменение давления ΔP , МПа	Шероховатость формы R_{zf} , мкм	Прочность формы σ_p , МПа	Газопроницаемость Γ , ед.	Момент повышения давления
1	0	95	4,3	126	весь процесс через 15 с по 0,01 МПа
2	0,01	87	4,5	124	через 5, 10, 20 с по 0,01 МПа
3	0,03	73	4,6	119	каждые 5 с по 0,025 МПа
4	0,05	67	4,8	111	через 5, 10, 20 с по 0,025 МПа
5	0,075	68	5,1	99	через 5, 10, 20 с по 0,025 МПа
6	0,09	68	5,2	91	через 5, 10, 20 с

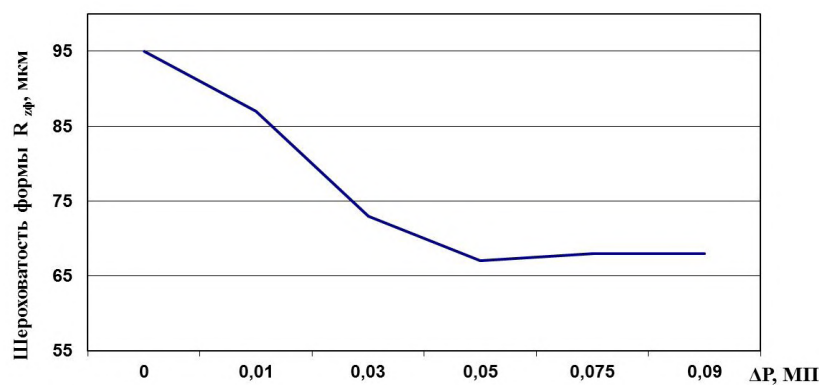


Рис. 5. Зависимость шероховатости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки

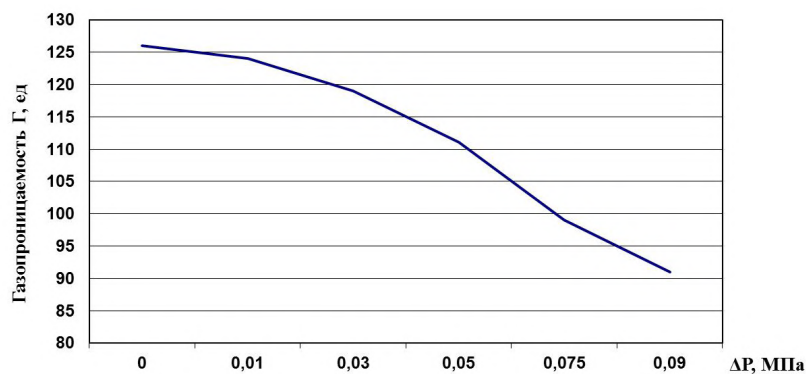


Рис. 6. Зависимость газопроницаемости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки

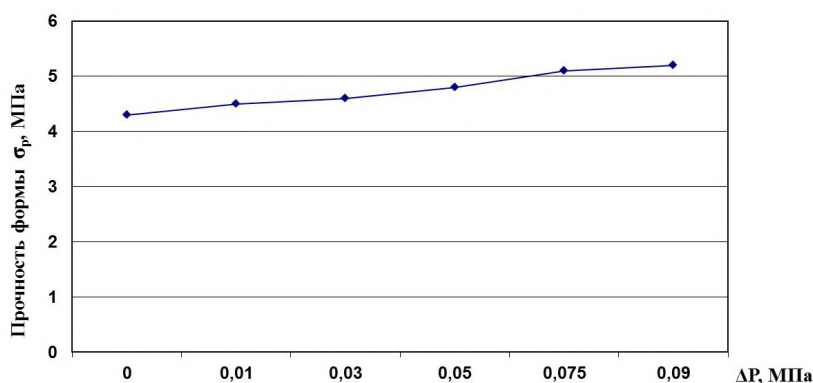


Рис. 7. Зависимость прочности формы от изменения давления в процессе формирования оболочки

приведён на рис. 5. Зависимости газопроницаемости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки и прочности формы от изменения давления в процессе формирования оболочки показаны на рис. 6, 7 соответственно. Начальное давление во всех случаях составляло 0,2 МПа. Время выдержки оболочки на плите — 30 с при температуре 250 °С. Спекание оболочки происходило в электропечи при температуре 350 °С в течение 180 с. Наполнитель — песок фракций в соотношении 1K0315—70 % и 1K02—30 %. Связующее — пульвербакелит — 5 %.

Таким образом, из выше приведенных экспериментальных зависимостей следует, что изначальное приложение нагрузки 1,8 ... 2,5 МПа в процессе формообразования оболочки значительно повышает чистоту поверхности формы и её механические свойства, при снижении количества пригара на отливках, а увеличение давления на смесь (на 0,03 ... 0,05 МПа относительно оптимального) в процессе формообразования снижает шероховатость оболочковых форм, не снижая при этом технологически необходимую величину газопроницаемости (100 ед.).

Использование данного способа изготовления форм экономически обосновано, так как снижается металлоёмкость отливок за счёт уменьшения толщины стенки отливок и улучшения чистоты поверхности. Полученные формы имеют равномерную плотность и толщину оболочки, а также чётко воспроизводят конфигурацию модели.

Предлагаемый метод получения форм вполне применим в промышленных условиях для изготовления отливок горношахтного оборудования.

Библиографический список

1. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства : учеб. в 2 ч. Ч. 2. Технология изготовления отливок в разовых формах / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андриянов. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. — 406 с.
2. Гини, Э. Ч. Технологии литейного производства. Специальные виды литья / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин. — М. : Машиностроение, 2008. — 352 с.
3. О реологических свойствах песчано-смоляных форм / А. З. Исагулов, В. Ю. Куликов, Т. В. Ковалёва, Е. П. Щербакова // Литейное производство. — 2015. — № 2. — С. 15—17.
4. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства : учеб. в 2 ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андриянов. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. — 384 с.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), директор машиностроительного института, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения, заведующий секцией оборудования и технологии сварочного производства Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

КОВАЛЁВА Татьяна Викторовна, преподаватель кафедры нанотехнологий и металлургии Карагандинского государственного технического университета, Республика Казахстан.

Адрес для переписки: sagilit@mail.ru

МОЗГОВОЙ Иван Васильевич, доктор технических

наук, профессор (Россия), профессор кафедры химической технологии и биотехнологии ОмГТУ.

Статья поступила в редакцию 03.06.2016 г.

© Е. Н. Еремин, Т. В. Ковалёва

УДК 621.762.04-023.5

**С. Н. ЛИТУНОВ
В. С. СЛОБОДЕНЮК
Д. В. МЕЛЬНИКОВ
В. В. ФЕДЯНИН
Н. С. КОЩЕЕВА**

Омский государственный
технический университет

ОБЗОР И АНАЛИЗ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ЧАСТЬ 2

Рассмотрены различные способы и устройства 3D-печати. Предложена конструкция печатной головки 3D-принтера, использующая принцип струйной печати. Головка позволяет использовать для печати высоковязкие материалы и материалы на основе парафина. Проведен сравнительный анализ 3D-технологий с указанием их преимуществ и недостатков. Отражены основные тенденции развития отрасли в ближайшем и отдаленном будущем.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-технологии.

Данная статья является продолжением первой части обзора аддитивных технологий [1]. Ее цель — раскрыть потенциал еще не освещенных в нем технологий.

В статье описаны принципы работы, недостатки и преимущества следующих аддитивных технологий:

- стереолитография;
- цифровая светодиодная проекция;
- метод многоструйного моделирования;
- струйная трехмерная печать;
- печать способом ламинирования.

В заключительной части приведены общие тенденции развития технологий трехмерной печати. Что уже широко используется в производстве и чего стоит ожидать от трехмерных технологий в ближайшем будущем.

Стереолитография (Stereolithography, SLA-метод). Этот метод разработан и запатентован в 1986 году Чарльзом Халлом (Charles W. Hull) [2]. Впоследствии он создал компанию 3D Systems. Метод заключается в послойном нанесении жидкой фотополимеризующей композиции (ЖФПК) с отверждением каждого слоя лучом УФ-лазера. ЖФПК заливают в емкость, в которой и осуществляется печать изделия [3]. Для лучшего растекания ЖФПК в качестве стола используют сетчатую платформу. Толщина слоя композиции составляет 50–150 мкм, что определяется временем экспонирования и мощностью источника УФ-излучения. На рис. 1 представлена принципиальная схема работы устройства принтера, в котором реализован SLA-метод. Лазерный луч последовательно обходит контуры будущего

изделия, что приводит к полимеризации ЖФПК на поверхности материала. После формирования слоя платформа опускается (или поднимается, в зависимости от конструкции печатного устройства) и процесс повторяется.

По завершению печати остатки полимера на поверхности изделия удаляют в ванне с растворителем. Далее проводят окончательное облучение УФ-светом для завершения полимеризации. SLA-способ требует применения поддерживающих структур.

При использовании этого метода необходимо учитывать следующее. Чем больше начальная вязкость ЖФПК, тем проще происходит полимеризация, но тем труднее нанести слой. Чем выше светочувствительность ЖФПК, тем меньше энергии требуется для полимеризации, но тем короче время его хранения.

К преимуществам данного способа можно отнести:

- высокую скорость печати (зависит от размеров модели и количества одновременно используемых лазерных головок);
- высокую точность печати;
- возможность изготовления сложных прототипов, включая тонкостенные модели.

К недостаткам относятся:

- использование токсичных материалов;
- высокая цена расходных материалов (1 л фотополимерной смолы стоит порядка \$80–\$120);
- высокая стоимость принтеров (стоимость принтеров составляет \$10–\$500 тыс.);
- необходимость рекуперации либо утилизации отработанных материалов (полимеров и растворителей);

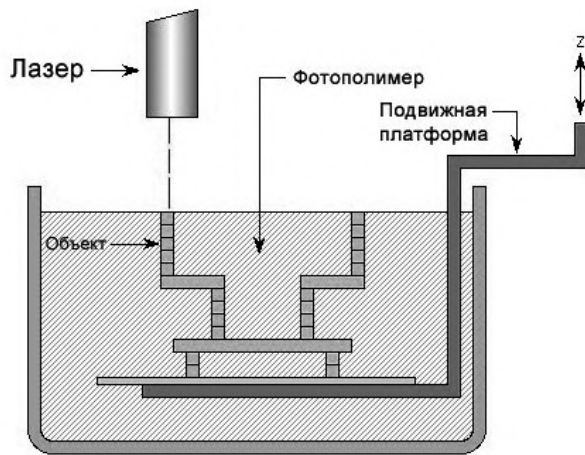


Рис. 1. Принципиальная схема работы устройства по SLA-технологии

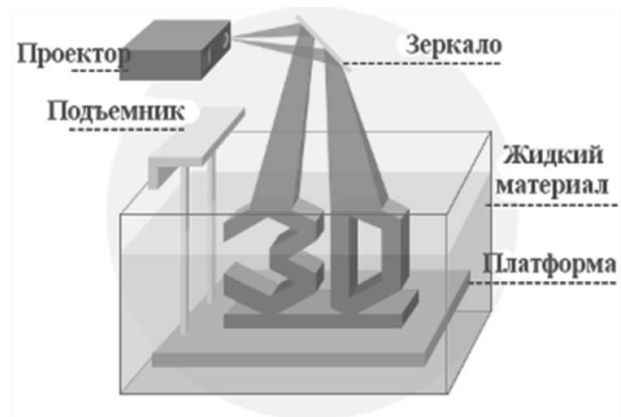


Рис. 2. Принципиальная схема работы 3D принтера по технологии DLP

— невозможность цветной печати и сочетания разных материалов в одном цикле;

— необходимость использования поддержек.

Цифровая светодиодная проекция (Digital Light Processing, DLP-метод). Аналог стереолитографии, с тем отличием, что на ЖФПК проецируется весь слой целиком, благодаря применению микроскопических зеркал.

Светодиодное проецирование в трехмерной печати является альтернативой SLA-метода, который широко распространен, но имеет высокую стоимость. В DLP-методе могут использоваться серийные светодиодные проекторы общего назначения, что в несколько раз снижает затраты на оборудование. Работа таких проекторов основана на применении микроэлектромеханической системы (MEMS), которая создает изображение, управляя зеркалами на полупроводниковом чипе. Схематично устройство для DLP-способа показано на рис. 2 [4]. В DLP-способе на слой фотополимера изображение, соответствующее этому слою, проецируется покадрово, целиком, для чего исходную 3D-модель изделия разбивают по слоям с шагом, равным толщине экспонируемого слоя ЖФПК. Минимальная толщина слоя при использовании DLP-способа составляет 10–15 мкм. Скорость печати зависит от чувствительности полимера и толщины экспонируемого слоя, но в целом она выше, чем у технологий FDM, SLA, SLS.

ЖФПК имеют широкий диапазон механических характеристик: от твердых пластиков до резиноподобных материалов. Печать осуществляется материалом одного цвета, что ограничивает область применения этого способа.

Преимущества DLP-способа:

- проецирование всего слоя целиком, что увеличивает скорость печати;
- высокая точность построения за счет отсутствия искажений, вызванных накоплением ошибки при движении печатающей головки в других методах и очень малой толщине слоя;
- высокая скорость построения, связанная с тем, что изображение проецируется покадрово;
- более низкая стоимость оборудования в сравнении с SLA из-за отсутствия лазера.

Недостатки способа:

- высокая стоимость ЖФПК;
- необходимость использования поддержек;
- невозможность вторичного использования

материала поддержек вследствие необратимости фотополимеризации;

— ограниченное время использования изделия из-за старения полимера.

Метод многоструйного моделирования (Multi-jet Modeling, MJM-технология). Эта технология запатентована компанией 3D Systems [5] в 1999 г. Нанесение слоев производится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопел. Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448. Печать производится термопластиками, восками и фотополимерными смолами.

В первых двух случаях материалы затвердевают за счет охлаждения. В случае печати фотополимерами каждый нанесенный слой обрабатывается ультрафиолетовым излучателем [6]. MJM-метод позволяет создавать поддержки нависающих элементов моделей из легкоплавкого воска. В случае использования вспомогательных восковых поддержек по окончании печати готовая модель нагревается в печи до температуры 60 °С для выплавки воска.

Технология обладает высокими показателями точности, сравнимыми с SLA-методом (минимальная толщина наносимого слоя доходит до 16 мкм, а разрешение печати достигает 750×750×1600 DPI). Точность составляет 10–20 мкм. Прочность на разрыв более 25МПа.

Преимущества технологии:

- малая толщина наносимого слоя;
- высокое разрешение печати;
- возможность многоцветной печати (при использовании устройства с несколькими печатающими головками);
- возможность сочетания материалов с разными свойствами.

Недостатки метода:

- необходимость использования поддержек;
- ограниченный выбор исходных материалов.

Технология MJM используется в различных отраслях, требующих создания высокоточных прототипов и готовых изделий для стоматологии, в ювелирном деле и разработке электронных компонентов.

Струйная трехмерная печать (Three Dimension Print, 3DP-способ). Разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT), США, в 1993 году [7]. Технология получила коммерческое

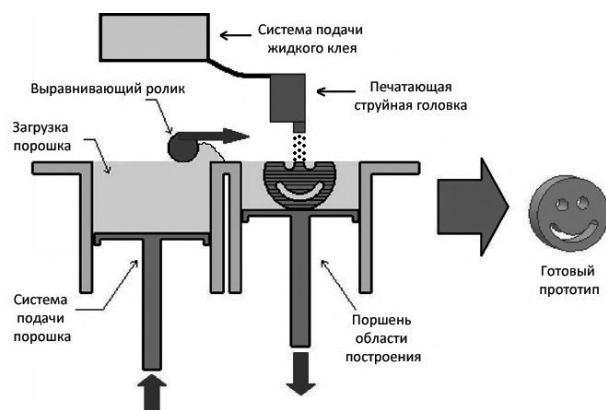


Рис. 3. Принципиальная схема работы устройства по технологии 3DP

распространение в 1995 году с помощью компании Z Corporation, приобретенной корпорацией 3D Systems в 2012 году.

В качестве исходного материала используются порошки пластиков, песчаных смесей, металлов. Валик разравнивает порошок по всей площади печатного стола. Контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал, который склеивает частица порошка в соответствии с заданным изображением (рис. 3) [8]. По завершению печати объект нагревается для высыхания клеящего состава. В связующий материал добавляют различные вещества (красители, уплотнители и пр.). Толщина слоя варьируется от 89 до 125 мкм, скорость работы от 870 до 2700 см³/час. Разрешение печати составляет 450 dpi.

Функциональные возможности полученных изделий зависят от последующей обработки. Для улучшения механических свойств изделия обжигают в печи. Во избежание деформации изделий обжиг, как правило, проводят не для спекания, а для выплавки связующего материала с последующей пропиткой более твердым материалом. Например, возможна выплавка или выжигание связующих пластиков с одновременной пропиткой стального изделия расплавом меди или бронзы. Такая обработка увеличивает прочность изделия, но не доводит ее до прочности материала пропитки. Данный метод используют при производстве изделий сложной геометрической формы, которые в дальнейшем не подвергаются высоким механическим нагрузкам.

Преимущества 3DP-метода:

- долговечность изделий при дополнительной термической обработке;
- отсутствие поддержек;
- возможность повторного использования порошка;
- высокая скорость 3D-печати;
- возможность создания изделий сложной геометрической формы.

Недостатки:

- необходимость дополнительной термической обработки металлических изделий;
- механические характеристики, уступающие характеристикам изделий из сплошного металла;
- высокая шероховатость поверхности.

В качестве печатающей головки в MJM- и 3DP-способах используются пьезоголовки, что снижает ассортимент исходных материалов. Так, в одном из подразделений Омского государственного технического университета (Россия) проводились опыты

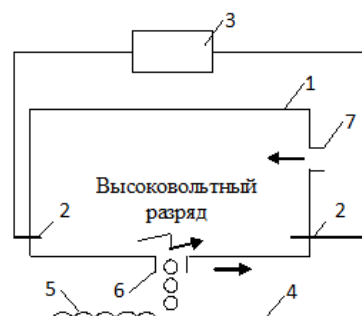


Рис. 4. Схема печатающей головки: 1 — корпус; 2 — электроды; 3 — источник высоковольтного разряда; 4 — поверхность печатного стола; 5 — нанесенный слой; 6 — сопло; 7 — питающее отверстие

по использованию в качестве исходного материала состава, в котором применялся наполнитель — корундовый порошок и связующее — фотополимер. Одной из проблем, с которой столкнулись исследователи, была недостаточно высокая вязкость исходного материала, с которым могло работать печатающее устройство, что объяснялось ограниченными возможностями пьезоголовок. Для расширения технологических возможностей 3D-печати предложено использовать печатающую головку, действие которой основано на принципе электрогидравлического эффекта (эффекта Юткина) [9]. Схематично печатающая головка показана на рис. 4.

Корпус 1 головки заполнен исходным материалом, которым должно быть текучее вещество. Принцип работы печатающей головки основан на том, что при прохождении через исходный материал высоковольтный разряд формирует волну высокого давления, направленную поперек оси, соединяющей электроды 2. Под действием давления исходный материал продавливается через сопло 6, и формирует слой 5 на изделии, расположенном на столе 4. При выдавливании исходного материала из головки, в ней возникает разрежение, под действием которого из питающего отверстия 7 поступает исходный материал. Преимущество предложенного решения заключается в том, что высоковольтный разряд создает высокое давление, которое позволяет продавливать через сопло жидкости, вязкость которых выше используемых до сих пор.

Печать способом ламинирования (Laminated Object Manufacturing, LOM-технология). Технология изобретена Михаэлем Фейгеном (Michael Feygin) в 1985 году и запатентована им в 1988 году [10]. Позднее способ доработан компанией Helisys Inc. Изначально LOM-метод предназначался для быстрого изготовления прототипов различных деталей. Метод подразумевает последовательное склеивание изготовленного заранее листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки. Изделия, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя определяется толщиной используемого листового материала.

Согласно этому способу, лист материала с клейким покрытием наносится на печатный стол или нижний слой изделия с помощью разогретого ролика (рис. 5) [11]. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры

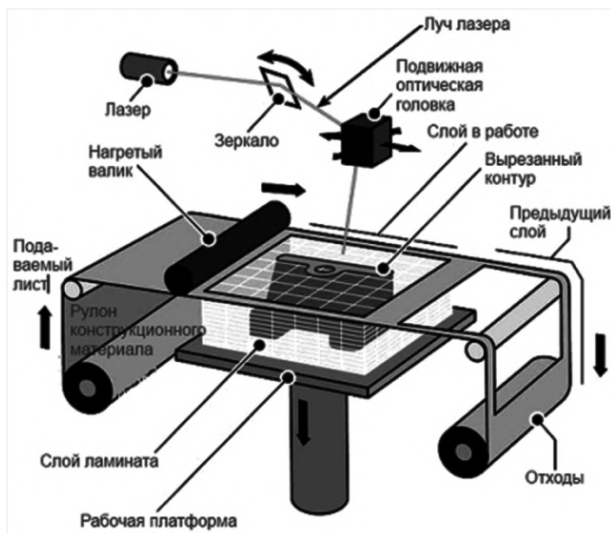


Рис. 5. Принципиальная схема работы устройства по технологии LOM

удаления. Платформа с готовым слоем передвигается вниз. В рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом. Цикл повторяется до завершения печати, после чего лишний материал удаляется, и производится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.)

Компания Mscor Technologies использует вариант этой технологии, получившей название «Выборочное ламинирование», или SDL-метод. Этот метод был изобретен братьями Коннором и Финтаном Маккормак в 2003 г. [12]. Он предусматривает нанесение клея только в предусмотренных для этого местах, что облегчает процесс удаления лишнего материала. Удаление лишнего материала осуществляется

с помощью лезвия из карбида вольфрама, что снижает стоимость печатающих устройств. Бумажные модели приближаются по физическим характеристикам к древесине, что позволяет проводить соответствующую механическую обработку. Разрешение печати уступает SLA-и SLS-технологиям.

Преимущества способа:

- низкая себестоимость производства;
- возможность создания крупногабаритных и цветных изделий;
- отсутствие потребности в поддержках.

Недостатки метода:

- ограниченность используемых материалов;
- необходимость дополнительной механической обработки после печати;
- невысокое разрешение печати;
- большое количество отходов.

Объединяя все вышесказанное, можно разделить 3D-технологии на несколько основных групп, отличающихся как принципами создания трехмерных объектов, так и свойствами отпечатанных изделий (табл. 1).

Закключение. Как видно, большая часть аддитивных технологий была изобретена во второй половине прошлого века, но бурное развитие они получили в начале текущего столетия. По-нашему мнению, причин этому несколько. Во-первых, на этот период пришлось развитие мощных тепловых лазеров и светодиодов, излучающих в УФ-диапазоне. Во-вторых, рынок потребовал от производителя индивидуализации каждого изделия, независимо от количества изделий в партии, вследствие чего в промышленном производстве начался выпуск изделий партиями от одного экземпляра. В-третьих, были разработаны основные принципы и подходы при единичном производстве той продукции, которую до сих пор изготавливали крупными партиями. Относительно последней причины можно отметить, что произ-

Таблица 1

Принципы создания трехмерных объектов

Метод	Технология	Исходные материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы, кобальтохромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальтохромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирования	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Листовой материал (бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка)
Полимеризации	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	

водство полиграфической продукции, быстро, как никакое другое, перешло в режим on-demand (печатать по требованию). Это стало возможным благодаря появлению так называемой цифровой печати (2D-печать на бумаге с помощью струйных и лазерных печатающих устройств). При этом был накоплен большой опыт такого производства, заложены основы организации работы в этих условиях.

В то же время российские предприятия, которые работают в области 3D-технологий, находятся на стадии кустарного или опытного производства и еще далеки по своей организации от уровня западных и европейских компаний.

Основными двигателями прогресса в индустрии трехмерного производства являются США, Германия и Китай, на их долю приходится до 90 % всех денежных вливаний, направленных на развитие отрасли [13].

Однако уже сейчас видны особенности 3D-печати, которые могут сдерживать их развитие: относительно малая скорость печати, ограниченный ассортимент исходных материалов, относительно невысокие характеристики изделий. Известные сегодня способы 3D-печати не позволяют получить изделия, которые полностью превосходят изделия, выполненные с применением классических технологий. Учитывая опыт развития 2D-печати, можно сделать следующее предположение о том, что скорость развития аддитивных технологий в скором времени снизится и они займут свой сегмент рынка, в котором они будут находиться вне конкуренции. Уже сейчас можно с уверенностью говорить, что 3D-технологии прочно заняли нишу создания стоматологических и хирургических имплантатов на Западе и в Китае. И в будущем количество таких сегментов будет только увеличиваться.

Аддитивные технологии еще не раскрыли весь потенциал и с каждым годом все больше внедряются в привычные производственные процессы во многих отраслях.

После истечения в 2009 году сроков патентов на технологию послойного наплавления (FDM) цены на такие устройства значительно снизились — с нескольких тысяч до 200–300 долларов, что позволяет иметь собственное устройство 3D-печати практически любому желающему.

В 2014 г. истекли сроки действия патента № US5597589 «Apparatus for producing parts by selective sintering» [14] на технологию выборочного лазерного спекания (SLS) и патента № US5597589 «Синхронное многослойное отверждение в стереолитографии». В 2015 г. истек срок действия патента № US5554336 «Методика и оборудование для производства трехмерных объектов при помощи стереолитографии». 20 декабря 2016 г. истекает срок действия патента № US6007318 «Методика и оборудование для создания прототипа трехмерного объекта».

Учитывая опыт появления доступных FDM-устройств, в ближайшем будущем стоит ожидать снижения цен и появления бюджетных вариантов SLS- и SLA-оборудования. А учитывая, что объективно и SLS, и SLA технологии превосходят по своим показателям FDM, то потребительский рынок 3D-печати ожидает новый виток бурного развития.

Библиографический список

1. Литунов, С. Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 / С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — 1 (145). — С. 12–17.
2. Hull, C. W., «Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography», US patent 4575330, filed August 8th, 1984, published March 11th, 1986.
3. Лазерная стереолитография. — Режим доступа : <http://3dpr.ru/lazernaya-stereolitografiya-sla> (дата обращения: 17.12.2015).
4. DLP-высокие показатели точности печати. — Режим доступа : <http://www.3d-format.ru/technologies/dlp/> (дата обращения: 17.12.2015).
5. Kulkarni, R. B., Manners, C. R., «Rapid prototyping method and apparatus with simplified build preparation for production of three dimensional objects», US patent № 6159411, filed Feb. 8th, 1999, published December 12th, 2000.
6. Технология многоструйного моделирования (MJM). — Режим доступа : http://3dtoday.ru/wiki/MJM_print/ (дата обращения: 19.12.2015).
7. Sachs, Haggerty, Cima & Williams, «Three-dimensional printing techniques», US patent № 5204055, filed December 8th, 1989, published April 20th, 1993.
8. 3DP и другие струйные технологии. — Режим доступа : <http://pm3d.ru/3dp-i-drugie-strujnye-tehnologii/> (дата обращения: 23.12.2015).
9. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект / Л. А. Юткин. — М. : Машгиз, 1955. — 50 с.
10. Feygin, M., «Apparatus and method for forming an integral object from laminations», US patent № 4752352, filed April 17th, 1987, published June 21th, 1988.
11. Изготовление объектов методом ламинирования. — Режим доступа : <http://3dprofy.ru/izgotovlenie-obektov-metodom-lamin/> (дата обращения: 27.12.2015).
12. Метод многослойного ламинирования. — Режим доступа : www.3dtoday.ru/wiki/sdl_print/ (дата обращения: 27.12.2015).
13. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. — М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
14. Переломный момент в истории 3D-печати. — Режим доступа : <http://3dwiki.ru/perelomnyj-moment-v-istorii-3d-pechati-istek-srok-patenta-na-tehnologiyu-sls/> (дата обращения: 08.01.2016).

ЛИТУНОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологий полиграфического производства.

СЛОБОДЕНЮК Василий Сергеевич, магистрант гр. ТПм-141 факультета элитного образования и магистратуры.

МЕЛЬНИКОВ Дмитрий Владимирович, студент гр. ТП-141 нефтехимического института.

ФЕДЯНИН Виктор Викторович, ассистент кафедры электротехники.

КОЩЕЕВА Наталья Сергеевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.

Адрес для переписки: Max.264@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2016 г.

© С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников, В. В. Федянин, Н. С. Кощеева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ 3D ПРИНТЕРА

Предложено для 3D печати моделей для литья по выплавляемым моделям использовать печатающую головку, работающую с использованием электрогидравлического эффекта (ЭГЭ). Для определения одного из важнейших параметров такой головки, давления в ее корпусе изготовлен фильерный узел и испытательный стенд. Подобраны модельные печатные составы на основе парафина и канифоли. Определена оптимальная температура расплава печатного состава. Получены зависимости давления внутри фильерного узла от модельного состава.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, 3D печать.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является наиболее точным способом литья, требующим минимального количества последующей механической обработки готовой отливки [1]. Анализ открытых источников показал, что в условиях снижения количества отливок в партии при одновременном повышении количества партий наиболее прогрессивным и перспективным является получение литейной модели с использованием 3D печати.

В открытой печати встречаются работы, касающиеся применения 3D печати в технологии ЛВМ. Часть работ посвящена обзору аддитивных технологий при изготовлении деталей методом ЛВМ [2–4 и др.]. Некоторые работы посвящены совершенствованию 3D печати в технологии ЛВМ [5–8 и др.]. Часть исследователей занимается совершенствованием модельного состава [9]. Работ, посвящённых прямому изготовлению моделей из литейного воска методом 3D печати, отмечено не было.

Для прямого изготовления моделей методом 3D печати применяют так называемый FDM-метод (Fused Deposition Modeling), который предусматривает получение литейной модели методом экструзии расплава полимера [10]. В качестве печатного материала наиболее часто применяют пластмассы с относительно низкой температурой плавления и высокой текучестью, такие как ABS- и PLA-пластики. В стандартных головках для FDM принтеров применяют фильеры с минимальным диаметром 0,15 мм. Такое отверстие при построении 3D модели позволяет получить наносимый слой толщиной 50–100 мкм.

Недостатком этого способа является то, что в процессе выплавления модели в труднодоступных местах литейной формы указанные пластики горят, образуя соединения, для удаления которых требуются дополнительные затраты. Кроме того, оставшийся в литейной форме полимер и продукты его

горения, попадая в заливаемый металл, снижают качество готовой детали.

В сети Internet встречаются заметки о попытках, в целом неудачных, использования литейного материала на основе парафина в FDM-принтерах [11]. Также для изготовления литейной модели применяют метод струйной 3D печати, который называется MJM-метод (Multi-jet Modeling). В качестве печатного материала используется состав на основе литейного воска [12]. Толщина слоя при печати составляет 16 мкм, точность 0,127 мм. В принтерах используются печатающие пьезоголовки.

Одной из проблем, с которой сталкиваются специалисты в данной области, является высокая текучесть расплава печатающего материала и особенности взаимодействия расплава и остывшего материала [11]. Известно, что регулировать реологические свойства жидкости можно за счет использования порошковых наполнителей. При этом жидкость приобретает тиксотропные свойства, которые должны сыграть положительную роль при построении 3D модели. Однако при введении наполнителя резко увеличивается вязкость полученной суспензии. Существующие пьезоголовки не предназначены для использования тиксотропных суспензий, что является их недостатком.

Для устранения указанных недостатков, а также для упрощения печатающего устройства предложена печатающая головка (рис. 1), принцип работы которой основан на электрогидравлическом эффекте (ЭГЭ, эффекте Юткина) [13]. Головка работает следующим образом [14]. Корпус головки 1 заполнен жидким печатным материалом (например, расплавом печатной композиции на основе парафина или иным). На электроды 2 подается высоковольтное напряжение и происходит разряд, в результате чего образуется фронт высокого давления, который распространяется в направлении сопла 6. Под действием давления печатный материал продавливается

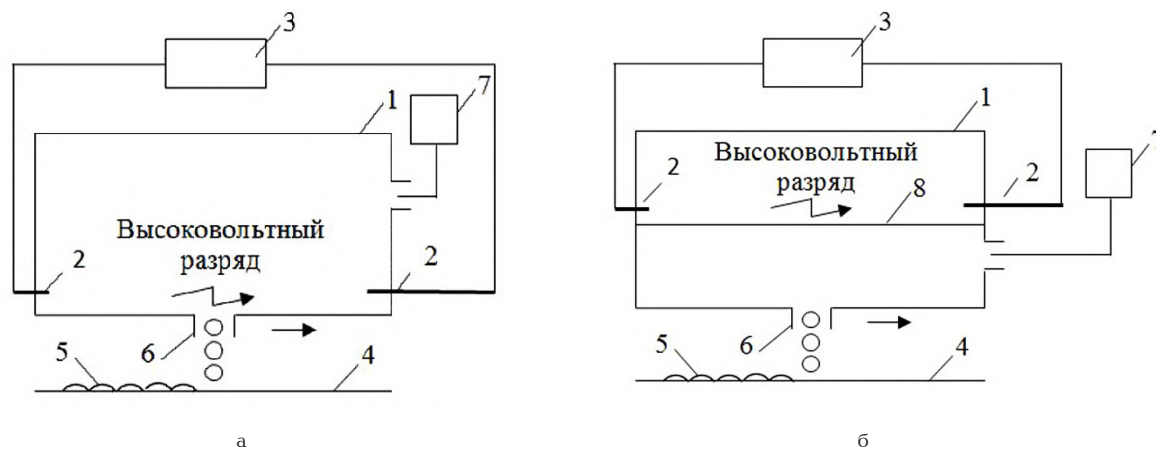


Рис. 1. Печатная струйная головка, работающая по ЭГЭ:

1 — корпус; 2 — электроды; 3 — высоковольтный источник тока; 4 — печатный стол; 5 — слой печатного материала; 6 — сопло; 7 — система подачи печатного материала; 8 — мембрана



Рис. 2. Испытательный стенд

через фильеру 6 и попадает на печатный стол 4, формируя слой 5.

Недостатком предложенной головки является образование нагара на электродах. Для устранения этого явления предложена печатающая головка [14], в которой корпус 1 разделен мембраной 8 на две части. Верхняя часть заполнена водой, и в ней расположены электроды 2. Нижняя часть снабжена фильерой 6 и системой подачи печатного материала 7. В этом случае вода не образует нагар на электродах и может работать длительное время в закрытом герметично пространстве, а давление на печатный материал оказывает мембрана, механические свойства которой подбираются исходя из давления, развиваемого в верхней камере, и сопротивления течению, развиваемого в нижней камере.

Толщину слоя определяют расход печатного материала через фильеру и расстояние между фи-

льерой и печатным столом. Головка перемещается в горизонтальной плоскости, а печатный стол — в вертикальной с помощью шаговых двигателей (на рисунке не показаны). Предварительные эксперименты показали работоспособность предложенной головки в расплаве парафина и канифоли.

Величина напряжения, форма и размеры камеры, в которой происходит разряд, зависят от свойств печатного материала. Свойства последнего, в свою очередь, зависят от области применения готового изделия. Так, для изготовления литейной модели печатный материал должен обладать следующими свойствами [15]:

- в жидком состоянии — хорошей текучестью, температурой плавления не более 100 °С, температурой затвердевания не выше 35–40 °С;

- в твердом состоянии — хорошими прочностными характеристиками; температурой размягчения не более 60 °С;

- при охлаждении — низким коэффициентом объемного расширения, равномерной усадкой не более 1–3 %.

Для изготовления моделей применяют составы, включающие парафин, церезин, стеарин, буроугольный воск, этилцеллюлозную канифоль, полиэтиленовый воск и другие вещества. В результате их смешивания получаются составы, из которых можно получить литейную модель, но обладающие весьма разными свойствами.

Для разработки печатающей головки 3D принтера необходимо определить мощность и производительность устройства, создающего давление в печатающей головке. Параметры устройства зависят от сопротивления течению печатного материала через фильеру. Для определения давления был разработан и изготовлен испытательный стенд (рис. 2), включающий фильерный узел, компьютер и разрывную машину фирмы Zwick/Roell (Германия) (скорость траверсы 0,0005–2000 мм/мин, точность измерения скорости 0,05 % от номинальной скорости, номинальное усилие 10 кН).

Фильерный узел включает стандартную плунжерную пару 1, применяемую в топливных насосах высокого давления, и корпус 3 (рис. 3а). В разрывной машине предусмотрена возможность проведения опытов в термокамере с температурой до 250 °С. Фильерный узел, помещенный в термокамеру разрывной машины, показан на рис. 3б.

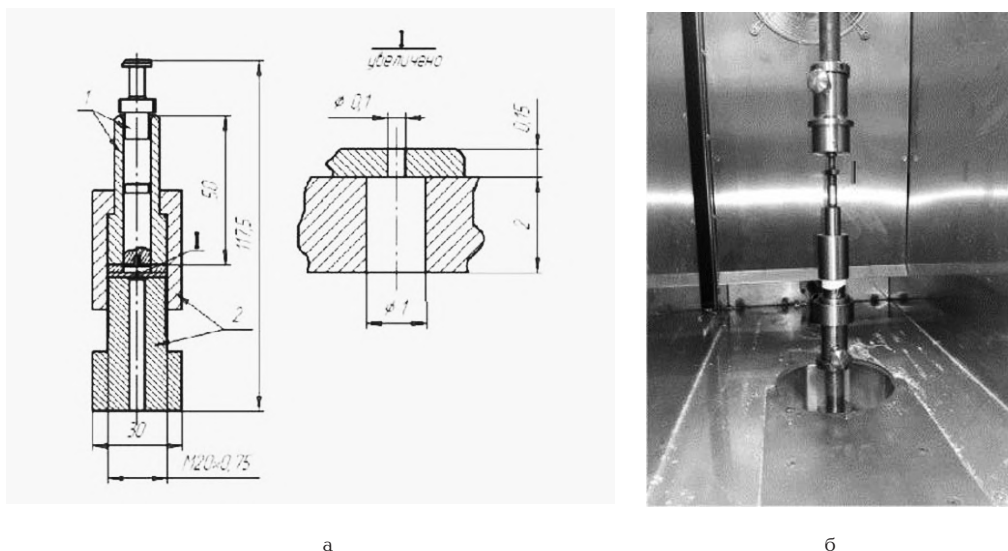


Рис. 3. Фильерный узел: 1 — плунжерная пара, 2 — корпус;
3 — пластина с отверстием;
а — фильерный узел в разрезе; б — фильерный узел, установленный
в термокамере разрывной машины



Рис. 4. Форма капли композиции парафина и технического углерода (слева)
и чистого парафина (справа)

Торец плунжера герметично закрывали пластиной толщиной 0,1 мм с отверстием диаметром 0,1 мм, внутрь плунжера закладывали печатный материал в количестве 1 см³, собранный фильерный узел помещали в зажимы разрывной машины.

В качестве печатного материала использовали две композиции, составы которых были подобраны в результате проведения предварительных экспериментов:

— состав 1: на основе парафина (парафин марки А — 70 %, технический углерод № 802 (Омск Карбон Групп, Россия) — 30 %);

— состав 2: на основе канифоли (канифоль паяльная — 80 %, технический углерод № 802 (Омский завод технического углерода) — 15 %, парафин марки А — 5 %).

Оба состава обладают свойствами, наиболее близкими к требованиям к литейному составу. Выбор применяемых материалов обусловлен доступностью, ценой и опытом их использования. Оба полученных состава обладают хорошими тиксотропными свойствами, что выражается в отсутствии растекания в расплавленном состоянии. Форма капли расплава чистого парафина и композиции парафина (85 %) и технический углерод № 802 (15 %), нанесенных на подогретый до температуры 65 °С металлический стол, показана на рис. 4. Из рисунка видно, что чистый парафин растекается по поверхности стола, а композиция из парафина

и технического углерода сохраняет форму даже в состоянии расплава.

Свойство тиксотропности позволит наносить последующий слой печатного материала на предыдущий без предварительного охлаждения последнего с сохранением формы. Однако следует отметить, что подбор компонентов печатного материала носит предварительный характер и требует дополнительных исследований.

Анализ скорости работы имеющегося в наличии 3D принтера позволил вычислить скорость движения зажима разрывной машины (скорость движения плунжера), соответствующей производительности принтера. Эта скорость составила 0,1 см/с. На рис. 5 и 6 показаны зависимости усилия на зажимах разрывной машины при указанной скорости движения зажима для расплавов составов № 1 и 2. Каждый опыт повторяли 3 раза, график зависимости строили как среднее между значений в каждом опыте. Кривые имеют зону нарастания и участок плато, который соответствует установившемуся течению расплава через отверстие. Значение усилия на участке плато является искомой величиной, через которую можно рассчитать давление в камере печатающей головки.

Опыты по определению вязкости расплава парафина и канифоли от температуры расплава в диапазоне температур 60—100 °С, выполненные с помощью воронки ВЗ-3, показали, что в указанном

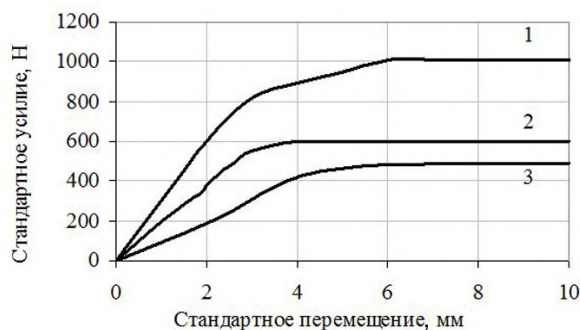


Рис. 5. Зависимость усилия на зажимах машины от температуры расплава состава № 1:
1 — 60 °C; 2 — 70 °C; 3 — 80 °C

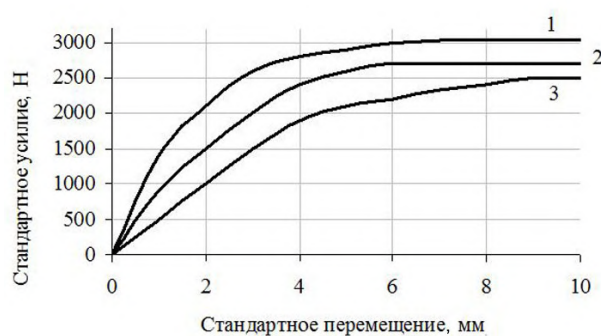


Рис. 6. Зависимость усилия на зажимах машины от температуры расплава состава № 2:
1 — 60 °C; 2 — 70 °C; 3 — 80 °C

диапазоне температур вязкость расплавов постоянна. Однако из рисунков видно, что усилие для максимальной и минимальной температуры отличаются в первом и втором случае на 500 Н. Это говорит о том, что введение технического углерода сделало вязкость составов зависимой от температуры.

Усилие для состава № 1 в 3–4 раза больше давления для состава № 2. Это объясняется более высокой вязкостью последнего. Кроме того, для состава № 1 разница усилия между кривой 1 и 2 составляет 400 Н, а между кривой 2 и 3 — 100 Н. Для состава № 2 разница между кривыми 1, 2, 3 составила 250 Н. Это можно объяснить более выраженной зависимостью вязкости расплава от температуры для состава № 1.

Расчет показал, что давление в цилиндре плунжерной пары для состава № 1 составило $(1–2) \cdot 10^7$ Па, а для состава № 2 $(5–6) \cdot 10^7$ Па. Этими значениями и необходимо руководствоваться при расчете и конструировании печатающей головки, действие которой основано на электрогидравлическом эффекте.

Выводы.

1. Прямое изготовление модели составами на основе легкоплавких материалов является наиболее оптимальной технологией при изготовлении деталей малыми партиями.

2. Существующие печатающие головки 3D печати, применяемые для прямого изготовления моделей, имеют существенные недостатки, от которых свободна печатающая головка, действие которой основано на электрогидравлическом эффекте.

3. Введение наполнителей в составы на основе парафина и канифоли придает им тексотропные свойства, что позволяет увеличить качество модели.

4. Проведенные эксперименты позволили определить рабочее давление в печатающей головке, значение которого необходимо учитывать при расчете и проектировании печатающей головки нового типа.

Библиографический список

1. Литье по выплавляемым моделям. Суть процесса. Основные операции и область применения. — Режим доступа : <http://uas.su/books/spesialmethodsforcasting/21/razdel21.php> (дата обращения: 10.06.2016).
2. Зубков, А. Третья промышленная революция. Аддитивные технологии 3D печати в наукоемких отраслях промышленности. — 2015. — Т. 7, № 83. — С. 73–78.

3. Макаров, М. Дорогие игрушки или чудо машиностроения? Обновляем литейные цеха / М. Макаров // Фотоника. — 2015. — № 6 (54). — С. 10–21.

4. Киселева, С. В. 3D технологии как инновационный путь развития современного предприятия / С. В. Киселева, А. Л. Миронова // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. — Курск, 2014. — С. 183–186.

5. Митраков, Г. Н. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий // Г. Н. Митраков, В. С. Сазонов, А. В. Полякова, И. С. Аникин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 85–87.

6. Филаткин, В. Реализация производства по индивидуальным заказам с помощью промышленных 3D принтеров / В. Филаткин // Технологии в электронной промышленности. — 2014. — № 7 (75). — С. 62–64.

7. Митраков, Г. Н. Использование аддитивных технологий при литье по выплавляемым моделям / Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лаврик, В. С. Сазонов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 80–84.

8. Агаповичев, А. В. Разработка методики литья сложных деталей аэрокосмического профиля с использованием аддитивных технологий / А. В. Агаповичев, А. В. Балякин, В. Г. Смелов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. — 2014. — № 5–2 (47). — С. 166–172.

9. Постижено, В. К. Наполненные модельные составы для изготовления отливок лопаток газовых турбин методом литья по выплавляемым моделям / В. К. Постижено, О. С. Береговая // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2009. — № 10. — С. 84–87.

10. Литунов, С. Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 / С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — № 1 (145). — С. 12–18.

11. 3D печать воском для литья по выплавляемым моделям. — Режим доступа : <http://www.chipmaker.ru/topic/168456/> (дата обращения: 08.05.2016).

12. Принцип создания моделей и заказ прототипа для литья из металла. — Режим доступа : <http://vektor.ru/lite-povyplavljaemym-modeljam/> (дата обращения: 11.06.2016).

13. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. — Л. : Машиностроение, 1986. — 254 с.

14. Пат. № 155865 Российская Федерация, МПК В 41 J 2/00. Печатающая головка для струйной печати / С. Н. Литунов, Ю. Д. Тоцакова ; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет. — № 2015124258 ; заявл. 22.06.2015 ; опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.

15. ЗАО Уральский завод цветных металлов. Модельные составы. — Режим доступа : <http://uzcm.ru/spravka/tech/model/1.php>. (дата обращения: 13.05.2016).

ЛИТУНОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологий полиграфического производства.

ФИЛЕНКО Наталья Ивановна, инженер кафедры оборудования и технологий полиграфического производства.

ЧЕМИСЕНКО Олег Владимирович, инженер научно-образовательного ресурсного центра «Поли-тест», аспирант кафедры физики.

КОЩЕЕВА Наталья Сергеевна, студентка гр. ТП-121 нефтехимического института.

Адрес для переписки: oitpp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2016 г.

© С. Н. Литунев, Н. И. Филенко, О. В. Чемисенко,
Н. С. Кошечева

УДК 621.01

**Ф. Н. ПРИТЫКИН
В. И. НЕБРИТОВ**

Омский государственный
технический университет

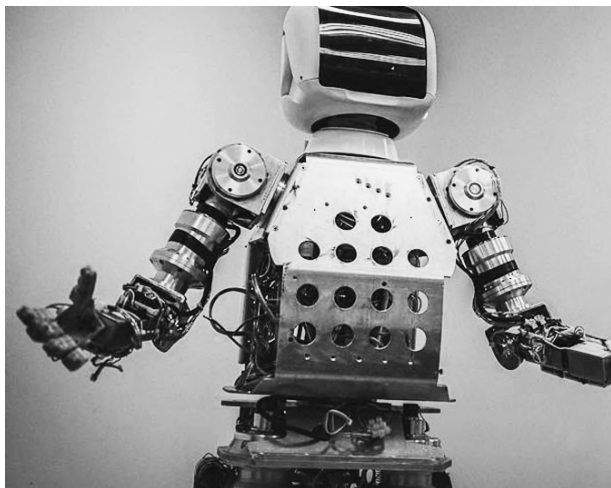
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ В МНОГОМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОБОБЩЕННЫХ СКОРОСТЕЙ, ЗАДАЮЩЕЙ ДОПУСТИМЫЕ МГНОВЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМА АНДРОИДНОГО РОБОТА

Исследована область допустимых значений вектора обобщенных скоростей андроидного робота для различных положений механизма руки при синтезе движений по вектору скоростей. Для аналитического задания области в многомерном пространстве использована теория множеств. В данной работе представлен метод, позволяющий сократить время синтеза движения манипулятора андроидного робота.

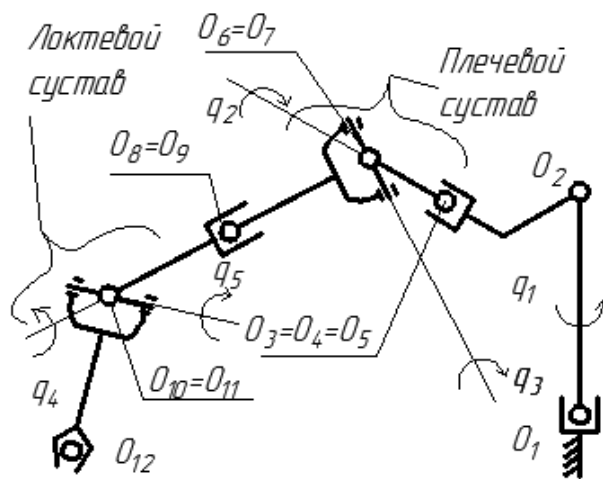
Ключевые слова: синтез движений роботов по вектору скоростей, двигательная избыточность, механизм манипулятора, интеллектуальные системы управления роботами.

С целью обеспечения автономного функционирования роботов в сложно организованных средах существует необходимость в разработке гибридных интеллектуальных систем управления [1]. Одной из составных частей данных систем управления является наличие блока обеспечивающего виртуальное моделирование на основе моделей окружающей среды и механизма манипулятора. В данных системах управления на начальном этапе реализации двигательной задачи возможности механизма манипулятора оценивают виртуально. Если задание от начальной до целевой точки смоделировано виртуально, после этого используется силовой алгоритм управления с применением системы оцувствления. Особую актуальность имеют указанные исследования при наличии двигательной избыточности. Двигательная избыточность позволяет строить движение при наличии запретных зон многовариативными способами.

В работе [2] исследованы максимальные значения параметров в некоторых точках конфигурационного пространства, задающие мгновенные состояния механизма андроидного робота AR-600E. Указанные мгновенные состояния механизма удовлетворяют заданной точности позиционирования δ центра выходного звена (ВЗ) при синтезе движений по вектору скоростей. Значения данных параметров используют при поиске значений вектора обобщенных скоростей $Q = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$. При этом значение вектора Q находится точкой N^Q , принадлежащей p -плоскости Γ^Q , которая задана линейной системой уравнений, определяющей взаимосвязь скоростей ВЗ и обобщенных скоростей [3–5]. Верхний индекс Q определяет принадлежность геометрических объектов многомерному пространству обобщенных скоростей Q . Размерность указанной p -плоскости Γ^Q , в пространстве Q определяет степень двигательной избыточности при синтезе движений. Положе-



а



б

Рис. 1. Механизм руки и туловища антропного робота AR-600E:
а — общий вид антропного робота;
б — кинематическая схема механизма руки

Таблица 1

Значения массивов и кодов, определяющих
геометрическую модель механизма антропного робота AR-600E

Массивы	Номер преобразования систем координат											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
q_i (град)	$q_1 = 25^\circ$	0	0	0	$q_2 = 20^\circ$	0	$q_3 = 65^\circ$	0	$q_4 = 25^\circ$	0	$q_5 = 65^\circ$	0
l_i (мм)	0	$l_1 = 300$	$l_2 = -120$	$\alpha = 80^\circ$	0	$l_3 = 100$	0	$l_4 = 80$	0	$l_5 = 150$	0	$l_6 = 250$
n_{kod}	3	12	11	7	3	12	2	12	3	12	2	12

ние точки $N^Q \in \Gamma^Q$ задаётся вектором Q_N и координатами k_1, k_2 и т. д. с использованием векторного уравнения:

$$Q_N = Q_M + \sum_{i=1}^l k_i \cdot m \cdot Q_i, \quad (1)$$

где Q_M — вектор, задающий точку $M^Q \in \Gamma^Q$, соответствующую критерию минимизации объёма движения [4]. Точка M^Q задает центр репера, связанного с p -плоскостью Γ^Q ; k_i — координаты точки N^Q в p -плоскости Γ^Q (каждой точке N^Q соответствует определенное мгновенное состояние механизма манипулятора); m — длина единичного отрезка репера p -плоскости Γ^Q ; Q_i — единичные направляющие векторы осей репера; l — размерность p -плоскости Γ^Q .

Известно, что манипулятивность механизма манипулятора характеризуют углом сервиса или углом U_s [2, 5, 6]. Разные конфигурации руки механизма обеспечивают различный угол U_s . Определим максимальное значение параметров k_i соотношения (1), при которых выполняется условие $\delta \leq 5$ мм на при-

мере механизма антропного робота AR-600E. Параметр δ задает заданную точность позиционирования центра ВЗ. На рис. 1 представлены общий вид и кинематическая схема механизма руки и туловища антропного робота AR-600E, положение которой определяют обобщённые координаты q_i ($5 \geq i \geq 1$).

Предельные значения обобщённых координат заданы следующими значениями q_i^{max} (120, 120, 120, 120, 120), q_i^{min} (−120, −120, 60, −120, 0). В соответствии с методикой обозначения геометрических моделей открытых кинематических цепей, принятой в работе [2] данный механизм имеет следующее обозначение: МЗ-12-10-8-3-12-2-12-3-12-2-12. Данное обозначение соответствует для случая, когда основание робота является неподвижным, а звенья руки заданы в виде отрезков прямых. Максимальные значения параметра k_i^{max} определим при направлении вектора скорости ВЗ $V(V_x, V_y, V_z)$ вдоль оси O_0x_0 при этом $V_x = 10$ мм/с, $V_y = 0$ и $V_z = 0$. Проведённые вычислительные эксперименты показывают, что направление вектора V существенного влияния

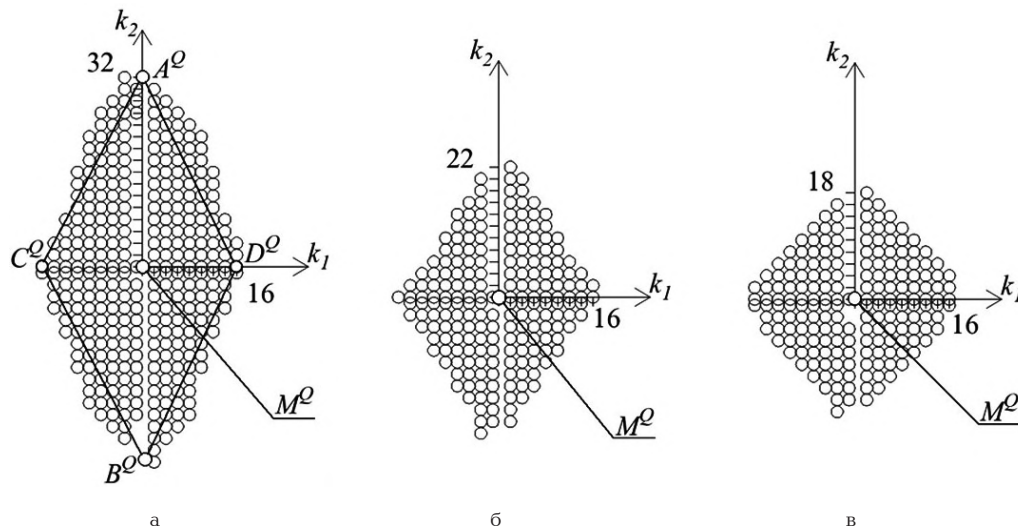


Рис. 2. Изображение области $\Delta^Q \in \Gamma^Q$, задающей допустимые значения вектора Q при $\delta \leq 5$ мм:
а — q_i (25°, 60°, 10°, 60°, 10°); б — q_i (25°, 60°, 20°, 60°, 20°); в — q_i (25°, 60°, 30°, 60°, 30°)

на область допустимых значений вектора Q не оказывает. Учитывая то, что размерность вектора V равна трем, а число обобщенных координат равно пяти, двигательная избыточность для рассматриваемого случая будет равна двум. В связи с этим далее r -плоскость Γ^Q будем называть 2-плоскостью. Ориентация ВЗ при синтезе движений, может быть какой угодно (указанную ориентацию обеспечивают другие обобщенные координаты, которые в данной работе не исследуются).

Значения списков массивов [2], характеризующих геометрическую модель исполнительного механизма руки, заданы в табл. 1. Значения длин l_i задают размеры звеньев механизмов, которые определяют отрезки $l_1 = O_1O_2$, $l_2 = O_2O_3$, $l_3 = O_3O_4$, $l_4 = O_4O_5$, $l_5 = O_5O_6$ и $l_6 = O_6O_7$ (рис. 1б). Параметр l_6 определяет расстояние до характерной точки кисти — центра ладони (данная точка принимается за центр ВЗ). В табл. 1 параметр n_{kod} определяет значение кода преобразований систем координат [2]. В работе [2] проведены исследования, связанные с определением максимального значения параметра k_i^{max} среди двух значений k_1^{max} и k_2^{max} . Однако между значениями k_1^{max} и k_2^{max} для различных конфигураций могут быть существенные различия.

С целью сокращения времени расчёта вектора Q рассмотрим способ задания области (которую обозначим Δ^Q), располагающейся в 2-плоскости Γ^Q и задающей допустимые значения вектора Q . Для этого используем метод, основанный на реализации мгновенных состояний [5]. В 2-плоскости Γ^Q отобразим всё множество возможных точек N^Q (задающие мгновенные состояния удовлетворяющие заданной точности позиционирования центра ВЗ $\delta \leq 5$ мм). Границы указанной области Δ^Q определяют максимальные значения параметров k_1^{max} и k_2^{max} . На рис. 2 представлены изображения областей Δ^Q для различных конфигураций антропического робота. Как видно, форма области Δ^Q близка к форме ромба. В соответствии с этим для минимальных значений k_i^{min} выполняются соотношения $|k_i^{min}| = k_i^{max}$.

Определение для каждой конфигурации погрешностей линеаризации, из области заданной в общем случае параллелепипедом (на основе использования значений k_1^{max} , k_1^{min} , k_2^{max} , k_2^{min}) требует дополнитель-

ное время вычислений при синтезе движений при наличии запретных зон. Для сокращения данного времени необходимо заведомо проводить анализ только тех точек, которые принадлежат области Δ^Q . В связи с этим было принято область Δ^Q приближенно задавать пересечением четырех полуплоскостей, заданных четырьмя прямыми, проходящими через точки A^Q , B^Q , C^Q и D^Q , являющиеся вершинами ромба (рис. 2а). Указанные точки располагаются на границе области Δ^Q и принадлежат осям k_1 и k_2 . Полуплоскости, принадлежащие 2-плоскости Γ^Q , заданные указанными прямыми обозначим $\Delta_1^Q, \dots, \Delta_4^Q$. Точки, которые принадлежат данным областям, удовлетворяют следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^2 d_{1l} k_l + b_1 &\geq 0, \\ \dots, \\ \sum_{l=1}^2 d_{ml} k_l + b_m &\geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где m — число прямых, ограничивающих область Δ^Q (для рассматриваемого примера $m = 4$); $l = 2$ — параметр, определяющий размерность 2-плоскости Γ^Q ; $d_{1l}, d_{2l}, \dots, d_{ml}, b_1, \dots, b_m$ — коэффициенты уравнений прямых, проходящих через точки A^Q, B^Q, C^Q и D^Q .

Для определения точек, принадлежащих пересечению областей $\Delta_1^Q, \dots, \Delta_4^Q$ используем функцию, называемую конъюнкцией [7]:

$$Y = X_1 \cap X_2 = X_1 + X_2 - \sqrt{X_1^2 + X_2^2}, \quad (3)$$

где X_1 и X_2 — являются аргументами R -функции, которые задаются неравенствами (2).

Подставляя вначале два неравенства (2) в уравнение (3) получают пересечение двух полуплоскостей, образующих область $\Delta_1^Q \cap \Delta_2^Q$.

Затем полученное уравнение области $\Delta_1^Q \cap \Delta_2^Q$ и третьей полуплоскости (2) подставляя вновь в уравнение (3) и получают уравнение области, определяющей пересечение областей $(\Delta_1^Q \cap \Delta_2^Q) \cap \Delta_3^Q$. В конечном итоге получают уравнение области Δ^Q :

Значения координат узловых точек интерполирования

Таблица 2

Обозначение точки в R^4	q_3	q_4	q_5	k_1^{max}	k_2^{max}	Обозначение точки в R^4	q_3	q_4	q_5	k_1^{max}	k_2^{max}
A_1	10	60	10	22	28	A_7	40	30	40	20	18
A_2	15	55	15	20	26	A_8	45	25	45	18	16
A_3	20	50	20	18	22	A_9	50	20	50	18	16
A_4	25	45	25	20	20	A_{10}	55	15	55	18	16
A_5	30	40	30	22	20	A_{11}	60	10	60	18	14
A_6	35	35	35	20	18						

$$\Delta^0 = ((\Delta_1^0 \cap \Delta_2^0) \cap \Delta_3^0) \cap \Delta_4^0. \quad (4)$$

С целью выяснения закономерностей изменения значений k_1^{max} и k_2^{max} в зависимости от положения механизма манипулятора, определяемого обобщёнными координатами q_i , найдены значения данных параметров для различных точек конфигурационного пространства. Результаты расчётов для одиннадцати точек представлены в табл. 2 (при значениях $q_1 = 25^\circ$, $q_2 = 20^\circ$ и $\Delta q_i = 5^\circ$). Для моделирования гиперповерхностей Σ_1 и Σ_2 в четырёхмерных пространствах R_1^4 и R_2^4 , определяемых параметрами k_1^{max} , q_3 , q_4 , q_5 и k_2^{max} , q_3 , q_4 , q_5 выбираем две узловые точки $A_1^{R1}(q_3, q_4, q_5, k_1^{max}) \rightarrow A_1^{R1}(10, 60, 10, 22)$ и $A_2^{R2}(q_3, q_4, q_5, k_2^{max}) \rightarrow A_2^{R2}(10, 60, 10, 28)$. Через данные точки проведём по три перпендикулярные 3-плоскости α_j ($j = 1, 2, 3$) и α_i ($i = 1, 2, 3$) соответственно в пространствах R_1^4 и R_2^4 , в каждой из которых лежат точки данных массивов точек (табл. 2).

В каждой из плоскостей α_j моделируем интерполирующие кривые данных массивов точек, которые будут являться одномерными образующими моделируемых гиперповерхностей в четырёхмерных пространствах R_1^4 и R_2^4 :

$$\begin{aligned} F(k_1^{max}, q_3, q_4, q_5) &= 0, \\ F'(k_2^{max}, q_3, q_4, q_5) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве одномерных образующих выбираем интерполирующие полиномы третьего порядка. Для этого в каждой из плоскостей $\alpha_i \in R_1^4$ выбираем по четыре узла интерполирования $\alpha_1 \rightarrow A_1'(10, 0, 0, 22)$; $A_4'(25, 0, 0, 20)$; $A_8'(45, 0, 0, 18)$; $A_{11}'(60, 0, 0, 18)$; $\alpha_2 \rightarrow A_1''(0, 60, 0, 22)$; $A_4''(0, 45, 0, 20)$; $A_8''(0, 25, 0, 18)$; $A_{11}''(0, 10, 0, 18)$; $\alpha_3 \rightarrow A_1'''(0, 0, 10, 22)$; $A_4'''(0, 0, 25, 20)$; $A_8'''(0, 0, 45, 18)$; $A_{11}'''(0, 0, 60, 18)$.

Уравнения интерполирующих полиномов, располагающих в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях α_1 , α_2 и α_3 , будут следующие:

$$\begin{aligned} k_1^{max} &= 23,1429 - 0,0971q_3 - 0,0021q_3^2 + 0,000038q_3^3; \\ k_1^{max} &= 19,1429 - 0,1695q_4 + 0,0059q_4^2 - 0,000038q_4^3; \\ k_1^{max} &= 23,1429 - 0,0971q_5 - 0,0021q_5^2 + 0,000038q_5^3. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты уравнений (6) вычисляют решением трёх систем четырех уравнений с четырьмя

неизвестными. Данные уравнения получают при подстановке в систему уравнение (7) координат точек A_1' , A_4' , A_8' и A_{11}' (а именно, q_3 и k_1^{max}).

$$\begin{cases} k_1^{max} = x_0 + q_1x_1 + q_1^2x_2 + q_1^3x_3, \\ k_1^{max} = x_0 + q_1x_1 + q_1^2x_2 + q_1^3x_3, \\ k_1^{max} = x_0 + q_1x_1 + q_1^2x_2 + q_1^3x_3, \\ k_1^{max} = x_0 + q_1x_1 + q_1^2x_2 + q_1^3x_3. \end{cases} \quad (7)$$

Решая данную систему, получаем коэффициенты для первого уравнения (6). Аналогично получаем коэффициенты для второго уравнения (6), подставив координаты точек A_1'' , A_4'' , A_8'' и A_{11}'' (q_4 и k_1^{max}), и для третьего уравнения (6), подставив координаты точек A_1''' , A_4''' , A_8''' и A_{11}''' (q_5 и k_1^{max}). Для получения уравнения моделирующей гиперповерхности $\Sigma_1 \in R_1^4$ необходимо суммировать уравнения (7) и сумму поделить на три [8]. Уравнение гиперповерхности третьего порядка Σ_1 после этого принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} k_1^{max} &= 21,8096 - 0,0324 \cdot q_3 - 0,0565 \cdot q_4 - 0,0324 \cdot q_5 - \\ &- 0,0007 \cdot q_3^2 + 0,00197 \cdot q_4^2 - 0,0007 \cdot q_5^2 + 0,0000127 \cdot q_3^3 - \\ &- 0,0000127 \cdot q_4^3 + 0,0000127 \cdot q_5^3. \end{aligned} \quad (8)$$

После аналогичных вычислений для второй гиперповерхности $\Sigma_2 \in R_2^4$ уравнения интерполирующих полиномов и второй гиперповерхности Σ_1 (5) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} k_2^{max} &= 37,42857 - 1,14476 \cdot q_3 + 0,02171 \cdot q_3^2 - 0,0001524 \cdot q_3^3, \\ k_2^{max} &= 11,42857 + 0,34476 \cdot q_4 - 0,01029 \cdot q_4^2 + 0,0001524 \cdot q_4^3, \\ k_2^{max} &= 37,42857 - 1,14476 \cdot q_5 + 0,02171 \cdot q_5^2 - 0,0001524 \cdot q_5^3, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} k_2^{max} &= 28,7619 - 0,3816 \cdot q_3 - 0,1149 \cdot q_4 - 0,3816 \cdot q_5 - \\ &- 0,0072 \cdot q_3^2 + 0,0034 \cdot q_4^2 - 0,0072 \cdot q_5^2 + 0,0000508 \cdot q_3^3 - \\ &- 0,0000508 \cdot q_4^3 + 0,0000508 \cdot q_5^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (8) и (10) позволяют определять значения k_1^{max} и k_2^{max} в зависимости от обобщённых координат q_3 , q_4 и q_5 при значениях, близких $q_1 \approx 25^\circ$ и $q_2 \approx 20^\circ$. Результаты исследований показали, что значения параметров q_1 и q_2

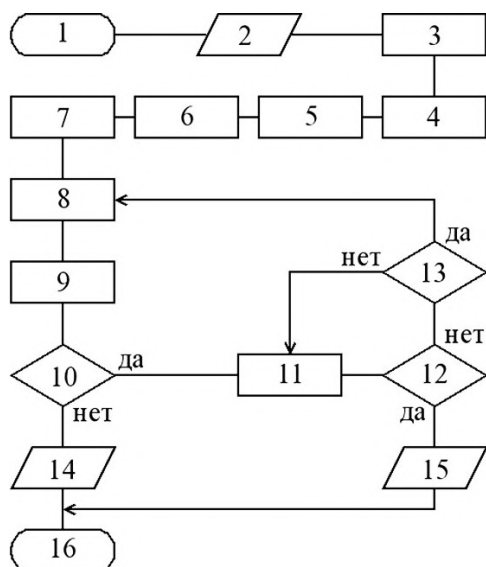


Рис. 3. Алгоритм вычисления значения вектора Q

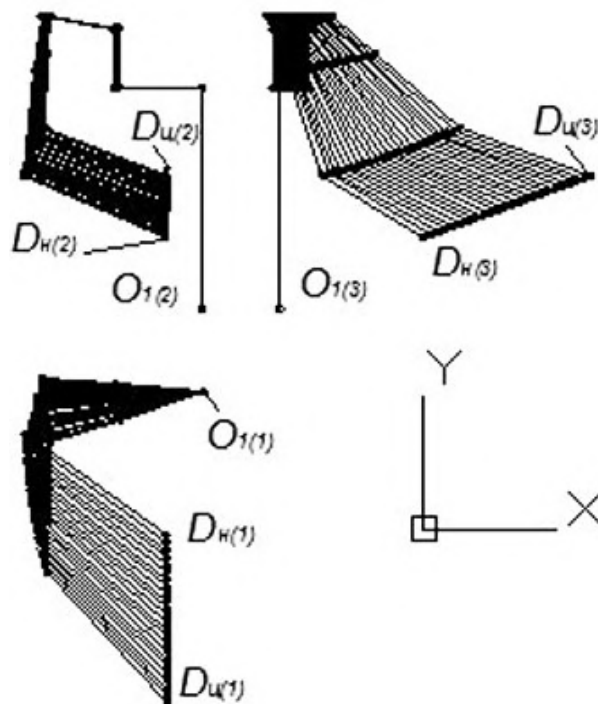
на положение и форму области Δ существенного влияния не оказывают. Относительная максимальная погрешность определения параметров k_1^{max} и k_2^{max} на основе использования соотношений (8,10) составляет 10–15 %.

Алгоритм вычисления допустимых значений параметров k_1 и k_2 представлен на рис. 3.

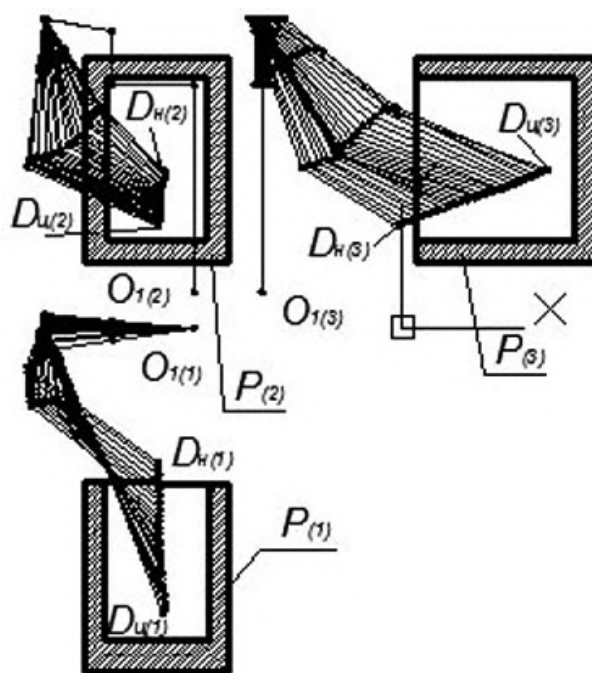
На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 — начало; 2 — ввод значений q_i ($q_1, q_2, \dots, q_5$), V (V_x, V_y, V_z) и δ ; 3 — определение узлов интерполирования из базы данных $(q_i - 13) \leq q_i \leq (q_i + 13)$; 4 — выбор узловых точек A_i и вычисления коэффициентов уравнений (6) и (9); 5 — определение коэффициентов уравнений (8) и (10); 6 — определение значений k_1^{max}, k_2^{max} в соответствии с уравнениями (8, 10); 7 — вычисление коэффициентов неравенств (2) и уравнения области Δ^Q (4); 8 — вычисление вектора Q (1); 9 — вычисление новой конфигурации $q_i = q_i + q_i$; 10 — конфигурация пересекает запретную зону; 11 — задание значений $k_1 = k_1 \pm 1, k_2 = k_2 \pm 1$, определяющих положение точки N^Q ; 12 — значения $|k_1| > k_1^{max}, |k_2| > k_2^{max}$; 13 — точка принадлежит области Δ^Q ; 14 — вывод значений вектора Q ; 15 — при синтезе движений возникла тупиковая ситуация; 16 — конец.

На рис. 4а представлены результаты виртуального моделирования движений руки андроида при использовании критерия минимизации объема движения и отсутствии запретной зоны. Моделирование движения выполнено в системе САПР ACAD с использованием алгоритмического языка программирования AutoLISP. На рис. 4б соответственно представлен синтез движений при наличии запретной зоны с использованием разработанного алгоритма вычисления значений вектора обобщенных скоростей Q . На рис. 4 обозначения D_n ($D_{n(1)}, D_{n(2)}, D_{n(3)}$) и D_u ($D_{u(1)}, D_{u(2)}, D_{u(3)}$) определяют соответственно проекции начальной и целевой точек при синтезе движений. Обозначения $P_{(1)}, P_{(2)}$ и $P_{(3)}$ задают положение запретной зоны на трех плоскостях проекций.

Использование соотношений (2, 4, 8, 10) позволяет на 80 % сократить время выполнения тестового задания по сравнению со способом, когда значения



а



б

Рис. 4. Результаты виртуального моделирования движения руки андроида от начальной точки, заданной вектором q_i ($-5^\circ, 20^\circ, 95^\circ, 25^\circ, -65^\circ$):
а — по критерию минимизации объема движения;
б — при наличии запретной зоны

k_1 и k_2 вычисляются с использованием параллелепипеда.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в интеллектуальных системах управления на этапе анализа виртуального взаимодействия механизма руки с внешней средой. Виртуальное взаимодействие при этом основано на использовании моделей руки андроида и окружающей внешней среды.

Библиографический список

1. Hasegawa, T. A model-based manipulation system with skill-based execution / T. Hasegawa, T. Suehiro, K. Takase // IEEE Trans., Robotics and Automation, 1992, Vol. 8, № 5, pp. 535–544.
2. Притыкин, Ф. Н. Определение максимальных значений параметров, задающих угол сервиса и множество конфигураций андроида робота реализацией мгновенных состояний / Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3506 (дата обращения: 09.03.2016).
3. Whitney, D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators / D. E. Whitney // J. Dyn. Sys., Meas., Control 94 (4), 303–309 (Dec 01, 1972) (7 pages) doi:10.1115/1.3426611History: Received August 01, 1972; Online July 13, 2010, pp.19–27.
4. Кобринский, А. А. Манипуляционные системы роботов / А. А. Кобринский, А. Е. Кобринский. — М. : Наука, 1985. — 343 с.
5. Притыкин, Ф. Н. Графическое представление телесного угла и окружающего пространства руки при реализации мгновенных состояний манипуляторов / Ф. Н. Притыкин // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — 2002. — № 3. — С. 93–101.

6. Лебедев, П. А. Аналитический метод определения коэффициента сервиса манипулятора / П. А. Лебедев // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — 1991. — № 5. — С. 93–98.

7. Рвачев, В. Л. Методы алгебры логики в математической физике / В. Л. Рвачев. — Киев, 1974. — 256 с.

8. Вертинская, Н. Д. Задачи геометрического моделирования технологических процессов : науч.-метод. пособие / Н. Д. Вертинская. — М. : Издат. дом «Академии естествознания», 2015. — 132 с.

ПРИТЫКИН Федор Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры инженерной геометрии и САПР.

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

НЕБРИТОВ Валерий Иванович, магистрант гр. ИВТМ-153 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: vnebritov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.05.2016 г.

© Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов

УДК 621

**В. Н. ТАРАСОВ
И. В. БОЯРКИНА**

Сибирская государственная
автомобильно-дорожная академия,
г. Омск

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ СТРЕЛОВЫХ МАШИН ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ЗАКОНЕ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ

Выполнено исследование динамики гидравлического рабочего оборудования стреловой машины на основе предложенного аналитического решения дифференциального уравнения движения поршня силового гидроцилиндра стрелы, в котором входным воздействием является функция управления величиной проходных окон золотника гидрораспределителя.

Ключевые слова: гидрораспределитель, разгон, торможение рабочего оборудования, приведенная масса, коэффициент жесткости.

На рис. 1 в качестве примера современной стреловой машины представлен гидравлический экскаватор, рабочее оборудование которого управляется при помощи силовых гидроцилиндров.

Динамику рабочего оборудования современных мощных стреловых машин можно описать, рассматривая динамику движения поршня силового гидроцилиндра, на котором условно сосредоточена при-

веденная масса рабочего оборудования и полезного груза в ковше. Приведенная инерционная масса рабочего оборудования, как динамическое звено, обладает колебательными, демпфирующими и интегрирующими и другими свойствами.

Динамика разгона и торможения поршня силового гидроцилиндра описывается дифференциальным уравнением третьего порядка [1, 2]:

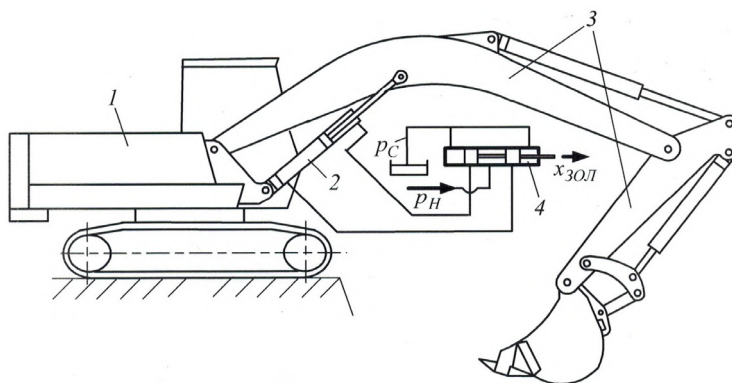


Рис. 1. Одноковшовый экскаватор: 1 — поворотная платформа; 2 — силовые гидроцилиндры управления стрелой; 3 — рабочее оборудование; 4 — гидрораспределитель управления рабочим оборудованием

$$m_{\text{пр}}\ddot{s} + \vartheta_f\dot{s} + C_f s = K_f x, \quad (1)$$

где $m_{\text{пр}}$ — приведенная к поршню масса рабочего оборудования (стрелы, рычагов, полезного груза и других элементов), кг;

ϑ_f — коэффициент вязкого трения гидроцилиндра;

$\frac{Hc}{m}$; C_f — коэффициент жесткости гидросистемы, Н/м;

K_f — постоянный коэффициент, характеризующий расход рабочей жидкости гидросистемы;

x — величина открытия проходных окон золотника, м;

$\dot{s}$, $\ddot{s}$, $\ddot{\ddot{s}}$ — соответственно скорость, ускорение, производная от скорости $\ddot{\ddot{s}}$ имеет название рывок или резкость.

Дифференциальное уравнение третьего порядка представляет собой сочетание колебательного звена второго порядка и интегрирующего звена первого порядка.

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение третьего порядка с правой частью имеет аналитические решения и описывает быстропротекающие динамические процессы массы рабочего оборудования, приведенной к поршню.

В прикладных дисциплинах обычно выполняют численные решения дифференциальных уравнений на ПК [2]. Аналитические решения таких уравнений используются в работах [1, 3].

Аналитические решения позволяют более глубоко рассмотреть влияние таких физических параметров механической системы, как масса, коэффициент жесткости, коэффициент вязкого трения, скорость движения поршня, ускорение, динамическое давление в гидросистеме и т.д.

Правая часть дифференциального уравнения (1) является функцией управления и может быть различной.

Режимы ступенчатого управления золотником при ручном управлении описываются уравнениями: включение золотника (режим разгона): $x=0$ при $t \leq 0$; $x=x_{\text{max}}$ при $t > 0$; выключение золотника (режим торможения): $x=x_{\text{max}}$ при $t \leq t_i$; $x=0$ при $t > t_i$, где t_i — время движения стрелы.

Режим ступенчатого включения при разгоне рабочего оборудования в уравнении соответствует решению дифференциального уравнения (1) с постоянной правой частью $K_f x = \text{const}$.

Рассмотрим два типа решения дифференциального уравнения (1):

1 — с нулевой правой частью, когда механическая система погрузчика совершает свободные колебания; 2 — управляемое движение рабочего оборудования при ступенчатом (скачкообразном) управлении распределителем.

В дифференциальном уравнении (1) третьего порядка можно, используя замену $\dot{s} = V$, понизить его порядок:

$$m_{\text{пр}}\ddot{V} + \vartheta_f\dot{V} + C_f V = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) является дифференциальным уравнением второго порядка с нулевой правой частью, т.е. является аналогом дифференциального уравнения свободных колебаний по физическому параметру скорости поршня.

Приведем уравнение (2) к стандартной форме дифференциального уравнения затухающих колебаний [4, 5]:

$$\ddot{V} + 2n\dot{V} + \omega^2 V = 0. \quad (3)$$

Постоянные величины при переменных имеют следующий вид

$$2n = \vartheta_f / m_{\text{пр}}; \quad (4)$$

$$\omega^2 = C_f / m_{\text{пр}}; \quad (5)$$

где n — коэффициент затухания колебаний, рад/с; ω — круговая частота свободных колебаний, рад/с.

Дифференциальное уравнение силового гидроцилиндра второго порядка с правой частью имеет вид

$$\ddot{V} + 2n\dot{V} + \omega^2 V = \frac{K_f}{m_{\text{пр}}} x. \quad (6)$$

Уравнение (6) является дифференциальным уравнением второго порядка с правой частью и обладает колебательными и интегрирующими свойствами, т.к. при $x \neq 0$, т.е. при открытом золотнике распределителя скорость V поршня зависит от величины открытия проходных окон золотника распределителя, а перемещение поршня зависит от времени.

В уравнении (6) величина K_f определяется для режима установившегося движения, когда $\dot{V} = 0$; $\ddot{V} = 0$.

$$K_r = \frac{C_r V_{уст}}{x_{зол}}, \quad (7)$$

где $V_{уст}$ — установившееся значение скорости поршня после завершения процесса разгона.

Коэффициент затухания колебаний определяется по формуле

$$\beta_g = n/\omega, \quad (8)$$

где β_g — коэффициент демпфирования, $\beta_g = 0,1-0,6$.

При ступенчатом включении золотника $x=x_{\max}=\text{const}$ общее решение дифференциального уравнения (6) с правой частью имеет вид

$$V = e^{-nt}(C_1 \cos \omega_1 t + C_2 \sin \omega_1 t) + V_{уст}; \quad (9)$$

$$\dot{V} = e^{-nt}[(C_2 \omega_1 - C_1 n) \cos \omega_1 t - (C_2 n + C_1 \omega_1) \sin \omega_1 t]. \quad (10)$$

Начальные условия решения дифференциального уравнения (6) при ступенчатом включении золотника имеют вид: при $t=0$ $V_0=0$; $\dot{V}_0=0$, т.е. начальные скорость V_0 и ускорение $\dot{V}_0$ равны нулю. После включения золотника при $x = x_{\text{зол}}$ через некоторое время t переходного процесса устанавливается постоянная скорость движения поршня в гидроцилиндре: $V=V_{уст}$.

В режиме ступенчатого включения золотника при разгоне поршня в решениях дифференциального уравнения (9), (10) постоянные коэффициенты определяются из начальных условий:

$$C_1 = V_0 - V_{уст}; \quad C_2 = \frac{\dot{V}_0 + V_0 n - V_{уст} n}{\omega_1}.$$

После ступенчатого включения золотника в течение времени t_1 совершается затухающий переходный процесс, в котором колебания скорости и ускорения исчезают в соответствии с уравнениями (9), (10). При этом скорость приобретает установившееся значение $V \rightarrow V_{уст}$, а ускорение стремится к нулю: $\dot{V} \rightarrow 0$.

Следующей операцией динамического процесса является торможение поршня при ступенчатом выключении золотника, при котором прекращается подача рабочей жидкости в гидроцилиндры и происходит процесс торможения поршня.

Дифференциальное уравнение торможения поршня гидроцилиндра стрелы после ступенчатого выключения золотника имеет вид

$$\ddot{V} + 2n\dot{V} + \omega^2 V = 0. \quad (11)$$

Начальные условия при ступенчатом выключении золотника для дифференциального уравнения (11) имеют вид: при $t=0$ $V=V_0$; $\dot{V}=\dot{V}_0$. Конечные значения V и $\dot{V}$ на первом участке динамического процесса являются начальными для второго участка торможения поршня.

Решение дифференциального уравнения (11) при выключенном золотнике имеет вид

$$V = e^{-nt}(C_1 \cos \omega_1 t + C_2 \sin \omega_1 t); \quad (12)$$

$$\dot{V} = e^{-nt}[(C_2 \omega_1 - C_1 n) \cos \omega_1 t - (C_2 n + C_1 \omega_1) \sin \omega_1 t], \quad (13)$$

где C_1, C_2 — постоянные интегрирования, которые имеют вид

$$C_1 = V_0 - V_{уст}; \quad C_2 = \frac{\dot{V}_0 + nV_0}{\omega_1}. \quad (14)$$

Аналитические решения дифференциальных уравнений движения инерционной массы поршня позволяют выполнить исследования и расчеты влияния параметров рабочего оборудования машины на качество переходных процессов при ступенчатом управлении золотником гидрораспределителя.

На рис. 2 показаны переходные процессы ускорения a , скорости V и перемещения s поршня гидромеханизма рабочего оборудования, в котором варьируется величина коэффициента демпфирования β_g .

Одним из важных показателей качества переходных процессов ускорения a и скорости поршня V является время регулирования t_p — минимальное время, по истечении которого скорость V остается близкой к установившемуся значению с заданной точностью.

Представленные эксперименты показывают, что при коэффициенте демпфирования $\beta_g = 0,3-0,4$ ускорение a поршня за время $t_p = 0,3$ с приобретает нулевое значение, а скорость V становится равной установившейся скорости $V=\text{const}$.

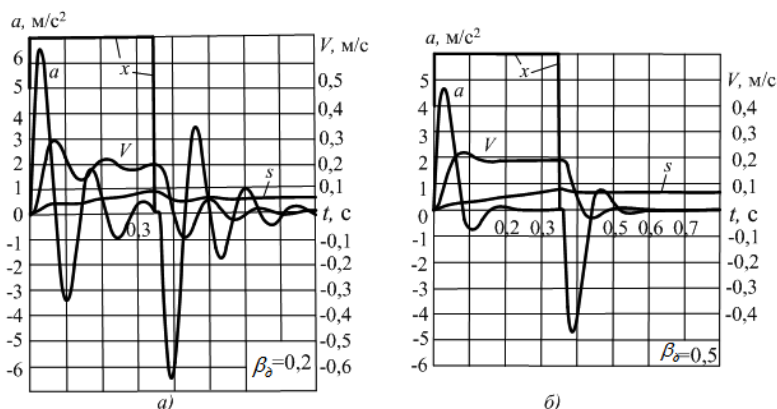


Рис. 2. Переходные процессы поршня при ступенчатом управлении золотником для разных коэффициентов демпфирования:
 x — координаты ступенчатого управления золотником;
 a, V — соответственно ускорение и скорость поршня;
 S — перемещение поршня

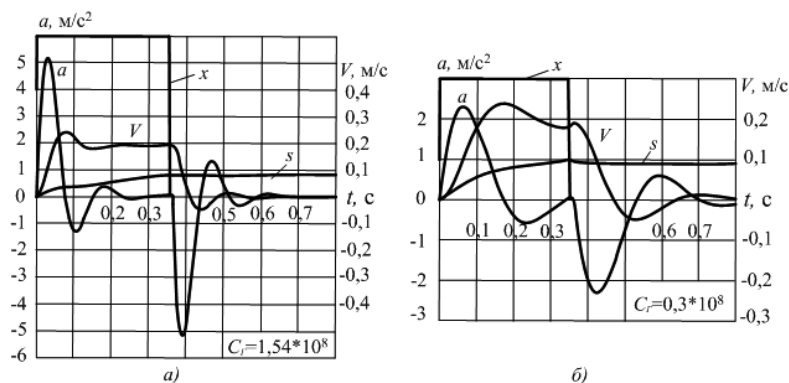


Рис. 3. Переходные процессы поршня при ступенчатом управлении золотником для разных коэффициентов жесткости

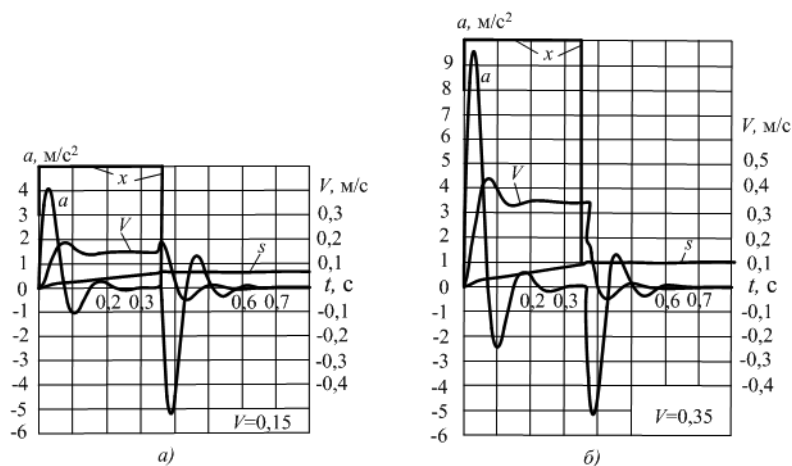


Рис. 4. Переходные процессы поршня при ступенчатом управлении золотником для разных скоростей движения поршня

При малом коэффициенте демпфирования гидропривод оказывается неработоспособным вследствие высокой колебательности.

На рис. 3 показано влияние коэффициента жесткости C_r на качество переходных процессов ускорения a и скорости V при ступенчатом включении и выключении золотника распределителя. Из графиков видно, что с уменьшением коэффициента жесткости C_r качество переходных процессов ускорения a и скорости V снижается. Таким образом, при значении коэффициента жесткости $C_r = 1,54 \cdot 10^8$ Н/м имеем удовлетворительное качество переходных процессов.

На рис. 4 показано влияние величины установившейся скорости $V = V_{уст}$ на качество переходных процессов.

Из графиков видно, что увеличение установившейся скорости V не оказывает негативных последствий на качество переходных процессов управления рабочим оборудованием. Однако это не может являться поводом к безусловному увеличению скорости движения поршня механической системы.

Для обоснования оптимальной скорости движения поршня гидроцилиндра стрелы необходимы глубокие экономические обоснования.

При времени регулирования $t_p = 0,2 - 0,3$ с ускорение и скорость приобретают установившиеся значения: $a \rightarrow 0$; $V \rightarrow V_{уст}$.

Из графиков видно, что при малом значении коэффициента жесткости $C_r = 0,3 \cdot 10^8$ Н/м гидропривод становится неуправляемым (рис. 3б). Из представленных результатов видно, что уве-

личение скорости поршня в два раза приводит к пропорциональному увеличению ускорения a , а соответственно, и сил инерции. При увеличении скорости возрастает износ уплотнений гидроцилиндров. Увеличение скорости поршня гидроцилиндра стрелы погрузчика является резервом повышения быстродействия, уменьшения времени элементов технологического цикла.

На рис. 5 представлено влияние приведенной массы $m_{пр}$ рабочего оборудования фронтального погрузчика на качество переходных процессов при ступенчатом включении и выключении золотника гидрораспределителя.

Анализ результатов показывает, что увеличение приведенной массы не приводит к ухудшению качества переходных процессов ускорения a и скорости V поршня гидроцилиндра механической системы. В рассмотренных случаях при разных приведенных массах сохраняется высокое качество переходных процессов: ускорение a стремится к нулю, скорость V приобретает установившееся значение в течение времени регулирования $t_p = 0,2 - 0,25$ с.

Для рассмотренных случаев можно отметить дополнительно другие показатели качества переходных процессов, к которым можно отнести: перерегулирование, частоту и число колебаний рабочего оборудования при управлении др.

Допустимые значения перерегулирования скорости поршня V обычно соответствуют $\sigma = 10 - 30\%$ [6].

Частота собственных колебаний массы стрелы погрузчика

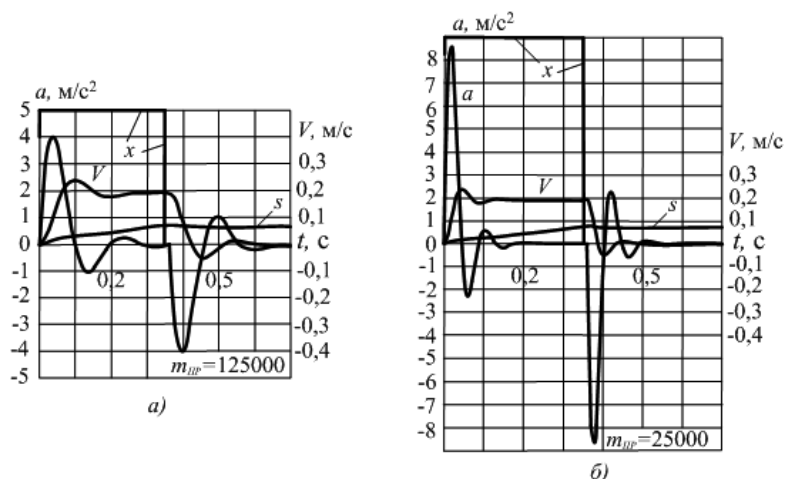


Рис. 5. Переходные процессы поршня при ступенчатом управлении золотником для разных приведенных масс

$$\omega = \sqrt{\frac{C_r}{m_{пр}}} = \frac{2\pi}{T}, \quad (\text{рад/с})$$

где T — период колебательного процесса.

Число колебаний n_k переходного процесса ускорения и скорости за время регулирования t_p не должны превышать $n_k = 1$ или 2, а иногда 3, 4. Выполненные аналитические исследования позволили установить закономерности влияния параметров гидропривода рабочего оборудования на выходные показатели и качество переходных процессов. Для современных динамических систем достаточным коэффициентом демпфирования является $\beta_0 = 0,3-0,4$.

Вывод. Получены аналитические решения дифференциального уравнения силовых гидроцилиндров и переходных процессов скорости и ускорения поршня для стреловых машин погрузчиков, экскаваторов, кранов.

Выполнены аналитические исследования влияния коэффициента демпфирования гидропривода β_0 , коэффициента жесткости C_r , приведенной массы и скорости поршня V на качество переходных процессов при разгоне и торможении рабочего оборудования стреловых машин.

Библиографический список

1. Тарасов, В. Н. Динамика систем управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин : моногр. / В. Н. Тарасов. — Омск, 1975. — 182 с.

2. Тарасов, В. Н. Теория удара в строительстве и машиностроении / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина [и др.]. — М. : Изд-во АСВ, 2006. — 336 с.

3. Бояркина, И. В. Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков : моногр. / И. В. Бояркина. — Омск : СибАДИ, 2011. — 336 с.

4. Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики : учеб. для строит. и приборостроит. спец. вузов / Н. Н. Никитин. — М. : Высш. шк., 1990. — 607 с.

5. Тарасов, В. Н. Теоретическая механика : учеб. пособие / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина, М. В. Коваленко, Н. П. Федорченко, Н. И. Фисенко. — 3-е изд. — М. : Транслит, 2015. — 560 с.

6. Гидравлика и гидропривод. В 2 ч. Ч. 2. Гидравлические машины и гидравлический привод / А. В. Лепешкин [и др.] ; под ред. А. А. Шейпака. — М. : МГИУ, 2003. — 352 с.

ТАРАСОВ Владимир Никитич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры механики.

Адрес для переписки: tarasov_vladimir07@mail.ru

БОЯРКИНА Ирина Владимировна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры механики.

Адрес для переписки: iriboyarkina@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28.04.2016 г.

© В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина

Книжная полка

621.83/Б20

Балакин, П. Д. Элементы теории реальных механических систем : моногр. / П. Д. Балакин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 270 с.

В монографии представлены результаты научных исследований в области механики машин, проводимых на кафедре машиноведения ОмГТУ под руководством автора. Показано, что ослабление единого влияния реальных параметров систем может быть достигнуто при реализации авторского принципа конструирования, в основу которого положен прием наделения механических систем свойством адаптации. Представляет интерес для работников конструкторских бюро и проектных организаций, научно-педагогических сотрудников вузов, аспирантов, магистрантов и студентов, обучающихся по механико-машиностроительным направлениям профессиональной подготовки.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

Рассмотрено построение динамических характеристик короткого замыкания для сравнения и разделения без предоставления осциллограмм или алгоритмов управления современных и традиционных процессов сварки короткой дугой.

Ключевые слова: короткое замыкание, сварка короткой дугой, динамическая характеристика, осциллограмма, источник питания.

Благодаря снижению тепловложению и контактному переносу капель электродного металла при коротком замыкании в отсутствии дуги процесс сварки короткой дугой имеет широкое распространение при сварке малых толщин и сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего. Недостатками процесса долгое время являлось повышенное разбрызгивание в большом диапазоне режимов, а также невозможность снизить тепловложение без уменьшения диаметра электрода и потери стабильности горения дуги.

Для устранения этих недостатков в разное время разрабатывались способы сварки, в которых обеспечивалось изменение скорости нарастания и спада токов начала и конца короткого замыкания [1], выравнивание их величин [2] и др.

В связи с успехами промышленной электроники, обеспечившей высокое быстродействие регуляторов электрических параметров, соизмеримое по времени с электрогидродинамическими процессами, протекающими при сварке, разработаны новые способы сварки короткой дугой, которые связывают изменение тока с фазами плавления и переноса электродного металла. Таким образом, появилась новая группа источников, имеющих быстродействующие системы управления током для реализации этих процессов.

Можно утверждать, что произошел переход от квазистатических режимов горения дуги, которые в достаточной мере характеризовались статическими характеристиками источника питания («напряжение — ток» при изменении нагрузки), к динамическим режимам, где дополнительными параметрами являются изменение во времени тока сварки и в некоторых случаях длина дуги (напряжение дуги или падение напряжения в промежутке электрод — сварочная ванна во время переноса электродного металла). Несмотря на обширные отечественные исследования в этой области, промышленное применение этих процессов с созданием соответствующих источников питания было осуществлено иностранными фирмами и закреплено в их названиях.

К таким процессам сварки короткой дугой относятся способы программируемого изменения сварочного тока: STT, coldArc, WiseRoot, CMT и др. [3].

С точки зрения разработчиков процесса STT, источник питания для этого адаптивного процесса нельзя причислить ни к источникам с падающими вольтамперными характеристиками, ни к источникам с жесткими характеристиками, так как ток в нем программируется в зависимости от состояния расплавленного металла на конце электродной проволоки. Таким образом, типовая внешняя характеристика такого источника, построенная в координатах «напряжение — ток» при монотонном изменении нагрузки (активного балластного сопротивления), не содержит информации о его работоспособности и технологических свойствах. Вместо внешней характеристики в этих работах приводится алгоритм управления сварочным током, реализуемый в зависимости от падения напряжения в промежутке электрод — сварочная ванна во время формирования капли электродного металла и ее переноса в сварочную ванну (рис. 1а) [3]. При реализации процесса сварки этот алгоритм требует дополнительных пояснений, так как осциллограммы реального процесса могут иметь отличия в зависимости от коррекции режима (рис. 1б) [4].

Если для схожего по форме тока процесса используется непрограммируемый источник со сложной внешней характеристикой, представляющей собой ломаную линию из семи сегментов, то по ней также трудно представить реальное изменение тока и напряжения при сварке [5] (рис. 2).

Таким образом, по мнению [4] оценить работу какого-либо источника питания для сварки короткой дугой невозможно без записи и анализа осциллограмм.

Без приведения осциллограмм сложно выявить отличия одного способа сварки от другого, получить информацию о значениях токов начала и окончания короткого замыкания, величины максимального тока в процессе сварки. Эти параметры являются важными и определяющими

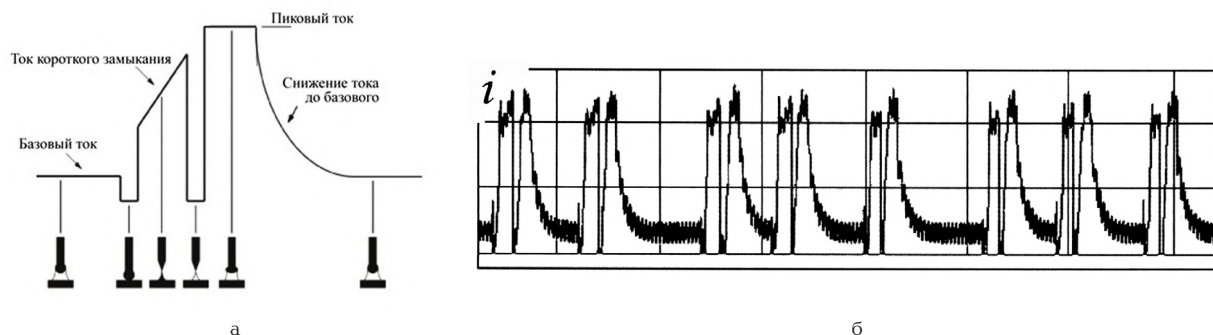


Рис. 1. Алгоритм изменения тока при коротком замыкании при сварке способом STT — а, осциллограмма процесса сварки — б

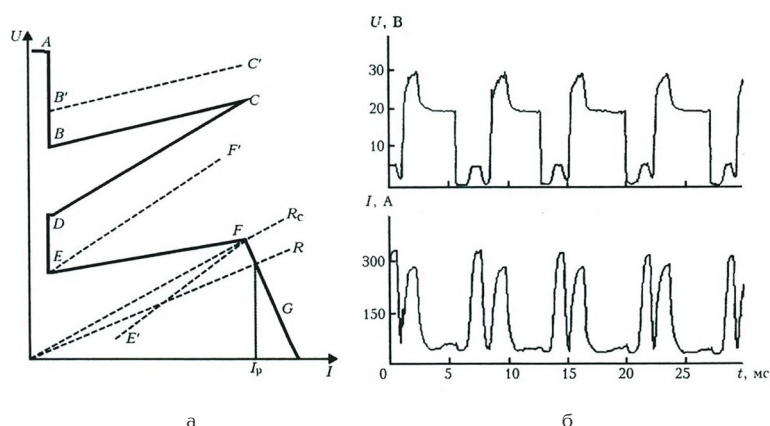


Рис. 2. Внешняя характеристика специального источника питания для сварки с короткими замыканиями — а и осциллограммы процесса сварки — б [5]

для разделения и оценки того или иного технологического процесса сварки короткой дугой.

Это разделение тем более необходимо, так как для разных типов процессов предлагаются разные способы оценки их стабильности [6, 7], связанные с применением компьютерной техники, которые со временем, вероятно, войдут в официальные документы сварочной диагностики.

На основании вышеизложенного и в связи с многообразием и существенными отличиями ранее разработанных и современных способов сварки с периодическими короткими замыканиями для разделения процессов, по нашему мнению, необходимы более формализованные и упрощенные графические признаки, чем представление записи осциллограмм.

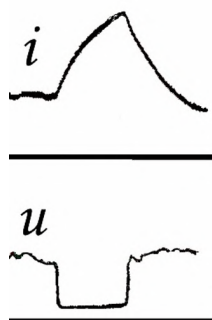
Наглядным, простым и достаточно информативным методом для сравнения и разделения современных и традиционных процессов сварки короткой («холодной») дугой без осциллограмм и алгоритмов, на наш взгляд, может быть представление заранее построенных динамических характеристик короткого замыкания при различных способах сварки. Так как в вышеупомянутых новых процессах сварки короткой дугой напряжение дуги и последующего короткого замыкания являются сигналом обратной связи, по которому производится управление сварочным током, то динамическая характеристика, построенная как изменение тока и напряжения короткого замыкания в одни и те же моменты вре-

мени в осях «ток — напряжение», позволяет определить основные параметры режима и их взаимное изменение.

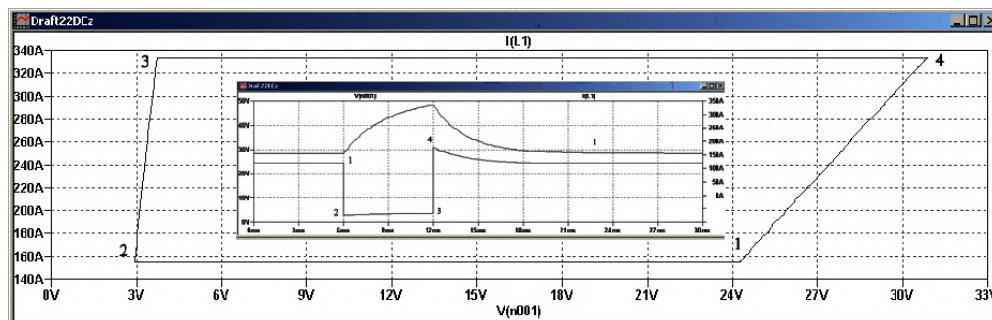
Построение может быть осуществлено по моделям процесса [8], в этом случае построение динамической характеристики осуществляется моделирующей программой, или по реальным осциллограммам типового короткого замыкания для данного процесса сварки как в абсолютных, так и в относительных единицах, если область оптимальных режимов достаточно широка.

Для традиционного классического способа сварки короткой дугой от источника постоянного (непульсирующего) тока динамическая характеристика имеет вид трапеции (рис. 3), где точки 1 и 2 определяют напряжение и ток начала короткого замыкания, а 3 и 4 — окончания. Величины тока и напряжения определяются параметрами силовой цепи источника питания.

В случае сварки выпрямленным током (имеющим пульсацию) вид характеристики аналогичен, если выпрямитель не имеет специальных устройств для обеспечения окончания короткого замыкания на спаде кривой пульсирующего тока. Но и без специальных устройств при сварке выпрямленным пульсирующим током возможны такие режимы, когда начало или окончание короткого замыкания происходит на спаде тока пульсации. Такие режимы обеспечивают меньшее разбрызгивание. В этом случае линии, являющиеся продолжением боковых сторон трапеции, показывают, в какой фазе pulsa-

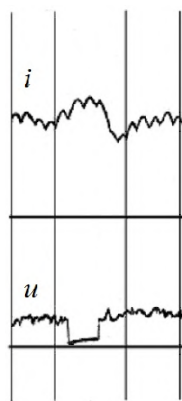


а

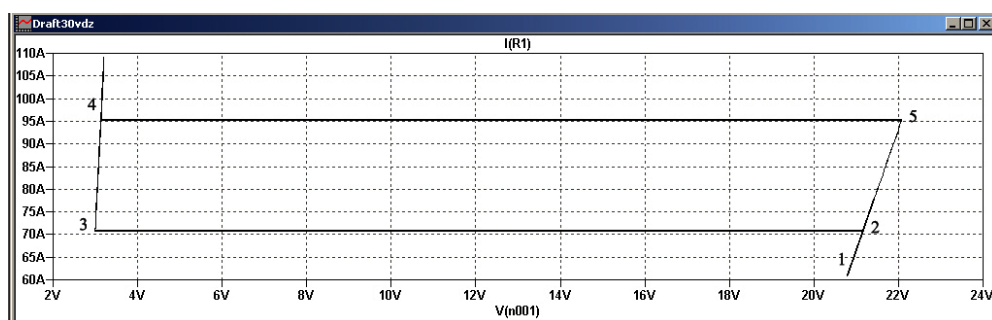
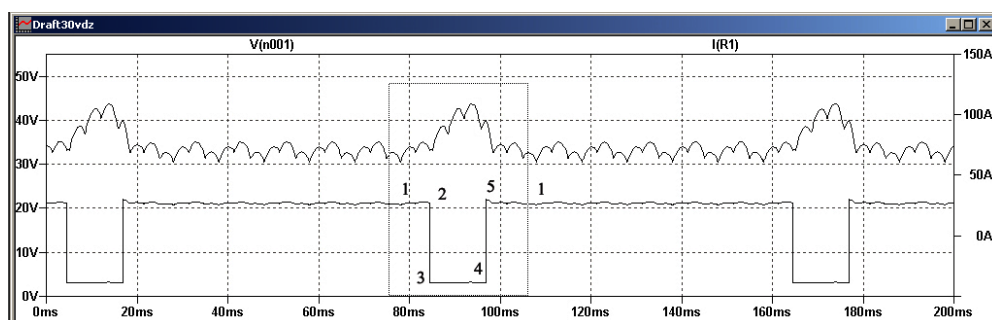


б

Рис. 3. Реальная — а и смоделированная (внутри динамической характеристики) осциллограммы короткого замыкания традиционного процесса сварки на постоянном токе и его динамическая характеристика — б



а



б

Рис. 4. Реальная — а и смоделированная осциллограммы короткого замыкания при сварке выпрямленным пульсирующим током — б (вверху) и динамическая характеристика — б (внизу)

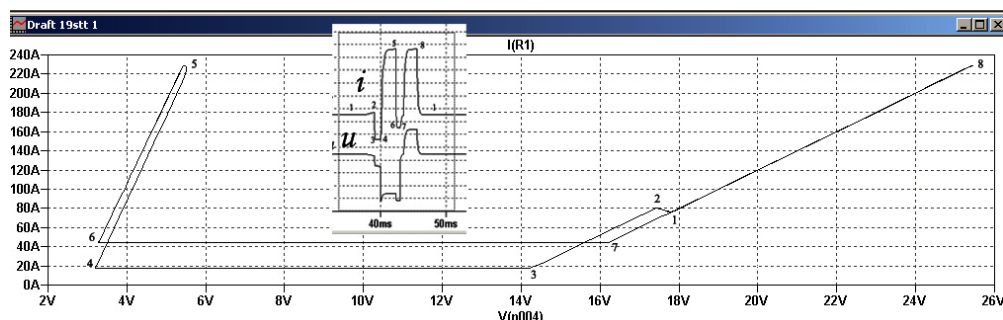


Рис. 5. Осциллограмма смоделированного адаптивного процесса сварки и его динамическая характеристика

ции происходит начало и окончание короткого замыкания (рис. 4).

Для процессов сварки, осциллограммы которых приведены на рис. 1 и 2 характер динамической характеристики существенно меняется (рис. 5). Из-

менение тока имеет сложную форму, а окончание короткого замыкания происходит при регулируемо сниженных значениях сварочного тока. Такая форма характеристики с током окончания короткого замыкания приближенного к току его начала

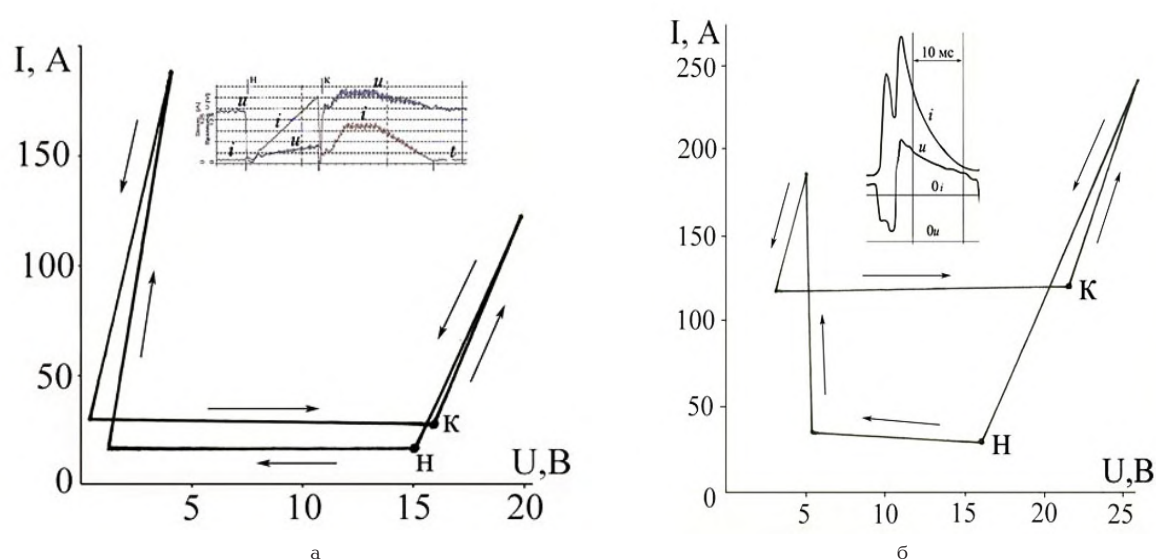


Рис. 6. Осциллограммы и динамические характеристики процессов сварки ColdArc — а и SteelRoot — б; н — точка начала короткого замыкания, к — окончания

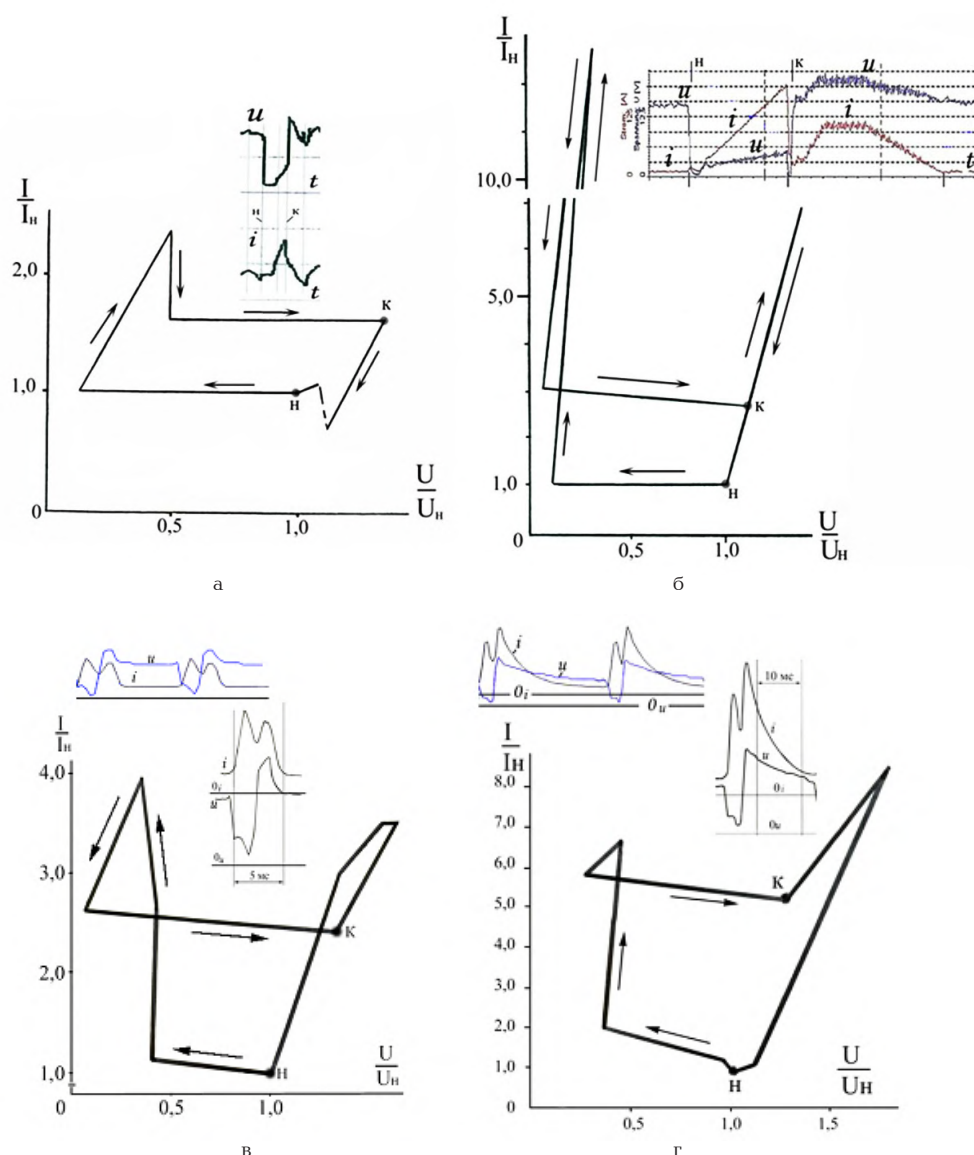


Рис. 7. Осциллограммы и динамические характеристики (в единицах относительно параметров начала короткого замыкания): процесс сварки ВКЗ — а [2]; способом ColdArc — б; способ SteelRoot — в и WiseRoot — г [3]; буквами «н» и «к» обозначены начало и конец короткого замыкания; I_n и U_n — ток и напряжение начала короткого замыкания

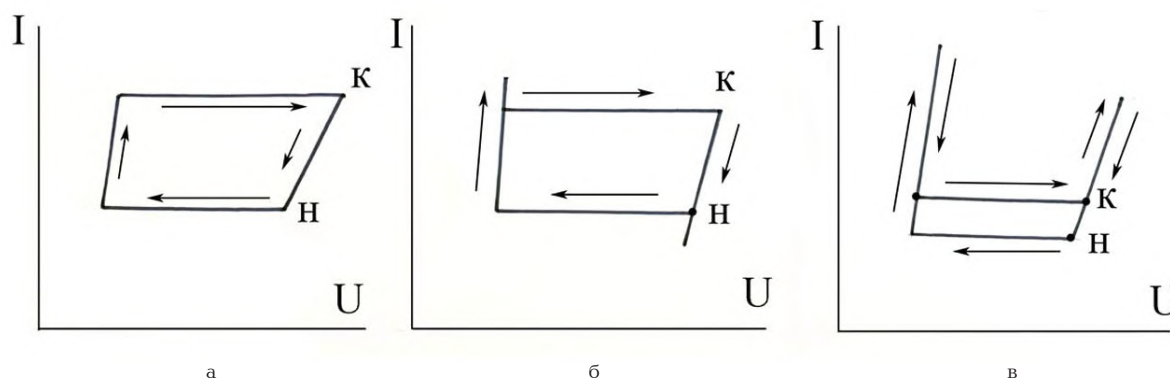


Рис. 8. Типовые динамические характеристики короткого замыкания при сварке короткой дугой: сварка постоянным током — а; сварка выпрямленным пульсирующим током (процесс ВКЗ, сварка от однофазных выпрямителей, от вентильных генераторов и т.п.) — б; один из адаптивных процессов — в

и существенно сниженного по отношению к максимальному току указывает на программируемый процесс.

На рис. 6 показаны динамические характеристики коротких замыканий адаптивных процессов ColdArc и SteelRoot, построенных по осциллограммам процессов сварки [3].

Для указанных процессов характерным признаком является сниженное значение тока окончания короткого замыкания. В одном случае многократно и при низком основном токе, что указывает на сварку на пониженной мощности при производстве тонкостенных конструкций, в другом в меньшей степени и при увеличении мощности после возбуждения дуги.

Построение динамической характеристики может быть и в относительных единицах (относительно тока начала короткого замыкания или среднего тока). В этом случае достаточно указать лишь значения тока и напряжения в начальной точке.

На рис. 7а показана динамическая характеристика процесса сварки выпрямленным пульсирующим током способом ВКЗ [2], на рис. 4б — динамическая характеристика выше упомянутого адаптивного процесса ColdArc, а на 7в и г — процессов SteelRoot и WiseRoot соответственно. И в этих случаях форма динамической характеристики позволяет оценить изменение тока и напряжения в процессе короткого замыкания и указывает на характер процесса. Соотношения токов максимального в период короткого замыкания, а также начала и конца его указывает на адаптивный характер процесса (рис. 7б, в, г), который имеет значительные отличия от сварки от выпрямителя с пульсирующим током, рис. 7а.

Во время сварки дуга испытывает множество внешних и внутренних неконтролируемых возмущений, влияние которых отражается на осциллограммах при большой скорости записи. Если не стремиться к детализации подобных процессов сварки и рассматривать осциллограммы для построения динамических характеристик, записанные при малых скоростях, только для выявления конечных значений тока в процессе короткого замыкания, то тогда динамическая характеристика будет состоять лишь из четырех прямых линий. Однако и этого достаточно для того, чтобы определить основные признаки трех типовых процессов сварки короткой дугой (рис. 8).

Представленная динамическая характеристика конкретного процесса сварки содержит информа-

цию о максимальном значении сварочного тока, о соотношении токов начала и конца короткого замыкания, об изменении тока по окончании короткого замыкания. Кроме этого, на этих характеристиках могут быть указаны возможные изменения тока и напряжения в диапазоне рекомендованного регулирования режима сварки или их изменения при корректировке программ, заложенных разработчиками способа.

Вышеуказанные динамические характеристики не несут информации о временных параметрах короткого замыкания, однако длительность короткого замыкания определяется значениями тока и напряжения при сварке, а длительность снижения тока, предшествующего возбуждению дуги в адаптивных режимах, практически во всех способах постоянна и устанавливается около одной миллисекунды.

Исходя из вышесказанного, динамическая характеристика является простым и наглядным графическим отображением обобщенного алгоритма функционирования источника питания для сварки с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка. Она отображает управляемость процесса сварки для данного источника питания и является таким же показателем его назначения, как падающая или жесткая внешние характеристики для традиционных способов сварки.

Библиографический список

1. Хейфец, А. Л. Сравнительная оценка некоторых способов уменьшения разбрызгивания металла при сварке в CO_2 / А. Л. Хейфец // Автомат. сварка. — 1986. — № 3. — С. 58–60.
2. Сравнительный анализ сварочно-технологических свойств современных выпрямителей для сварки в защитных газах / М. В. Карасев [и др.] // Сварка в Сибири. — 2003. — № 2. — С. 22–30.
3. Мухин, В. Ф. Источники питания и мультисистемы для современных технологических процессов сварки плавящимся электродом : моногр. / В. Ф. Мухин, Е. Н. Еремин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. — 96 с.
4. Козлов, И. К. Особенности мониторинга процесса сварки и состояния сварочного оборудования / И. К. Козлов // Сварка и диагностика. — 2013. — № 4. — С. 59–62.
5. Ланкин, Ю. Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими замыканиями дугового промежутка (обзор) / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. — 2007. — № 1. — С. 3–10.
6. Букаров, В. А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических

методов / В. А. Букаров, С. С. Ермаков, Т. А. Дорина // Сварочное производство. — 1990. — № 12. — С. 30–32.

7. Актуальные вопросы сварки неповоротных стыков трубопроводов в монтажных условиях / Н. П. Алешин [и др.] // Сварка и диагностика. — 2013. — № 3. — С. 36–40.

8. Мухин, В. Ф. Моделирование электрических схем маломощных сварочных выпрямителей / В. Ф. Мухин, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 73–78.

МУХИН Василий Федорович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры маши-

ностроения и материаловедения секции «Оборудование и технология сварочного производства».

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), директор машиностроительного института, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения, заведующий секцией «Оборудование и технология сварочного производства».

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.09.2016 г.

© В. Ф. Мухин, Е. Н. Еремин

УДК 62.752.2

**Ю. Ф. САВЕЛЬЕВ
Н. Ю. СИМАК**

Омский государственный
университет путей сообщения

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА С НОЖЕВЫМИ ОПОРАМИ

В работе приведены результаты поиска конструктивных решений по модернизации рессорного подвешивания подвижного состава с целью создания эффективной виброзащиты. Предлагается новая конструктивная схема, позволяющая упростить известные аналоги и повысить надежность.

Ключевые слова: рессорное подвешивание, виброзащита, дополнительные устройства, ножевые опоры, обоснование конструкции.

Известно, что типовое рессорное подвешивание подвижного состава по своим упругим характеристикам не обеспечивает необходимых условий виброзащиты экипажа и оборудования и, как следствие, требует ограничения скоростей движения.

Имеется несколько принципиальных путей решения этой проблемы, но все они либо очень дороги, либо небезопасны в сложных условиях эксплуатации железных дорог.

Есть перспективные направления, связанные с дополнением упругими устройствами, имеющими зону отрицательной жесткости в силовых характеристиках (рис. 1). Совместная работа типового рессорного подвешивания и дополнительных устройств позволяет реализовать суммарную нелинейную силовую характеристику, что дает значительные положительные результаты виброзащиты.

Имеется несколько конструктивных решений таких устройств, отличающихся кинематическими схемами [1, 2].

Недостатком конструкций является необходимость использовать в шарнирных узлах подшипников качения для устранения трения скольжения, наносящего отрицательное воздействие на эффективность виброзащиты.

Работа подшипниковых узлов в условиях эксплуатации железных дорог требует защиты от окружающей среды (влаги, пыли). Кроме этого, в дополнительных устройствах на шарниры воздействуют

большие силовые усилия, что ведет к увеличению их габаритов и массы.

Предлагаемая схема виброзащитного устройства отличается от прототипов конструктивной особенностью. В кинематической схеме в горизонтальном силовом узле используются так называемые в технической литературе ножевые опоры [3].

Ножевые опоры предназначены для подвижных частей, совершающих колебательные движения на небольшой угол, и состоят из ножа и подушки. Нож — призма выполняет роль цапфы и опирается скругленным ребром малого радиуса на опору — подушку — цилиндрическую поверхность большого радиуса.

Конструктивно виброзащитное устройство (рис. 2) состоит из ножевых стержней — 1, с внешней стороны упруго поджатыми опорами подшипника — 2. Подушки выполнены в виде двух угловых прорезей, в вершине которых имеется цилиндрическая поверхность большого радиуса. Они установлены в средней части двух упругих рессор — 3, посредством плиты — 4, жестко связаны с рамой тележки — 5. Неупругие подвижные опоры подушки — 6 совмещены и представляют собой такие же поверхности, связанные посредством тяги — 7, шарниров — 8 и регулировочного узла — 9, с буксой колесной пары — 10.

Длина стержней — 1 и жесткость рессор — 3 рассчитывается из условий обеспечения в гори-

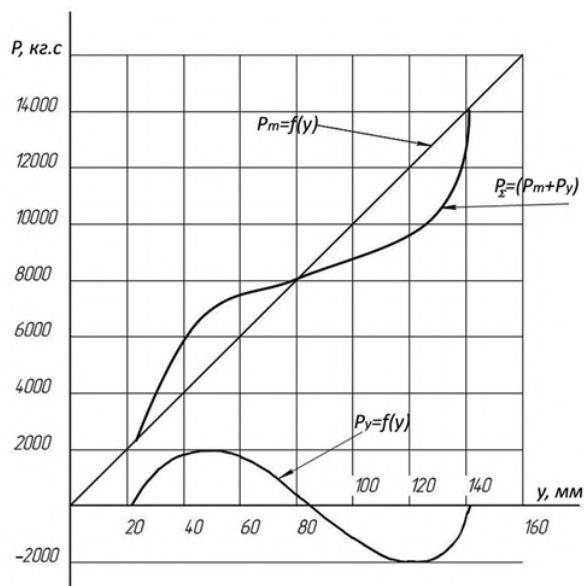


Рис. 1. Суммарная силовая характеристика — P_{Σ} комбинированного рессорного подвешивания

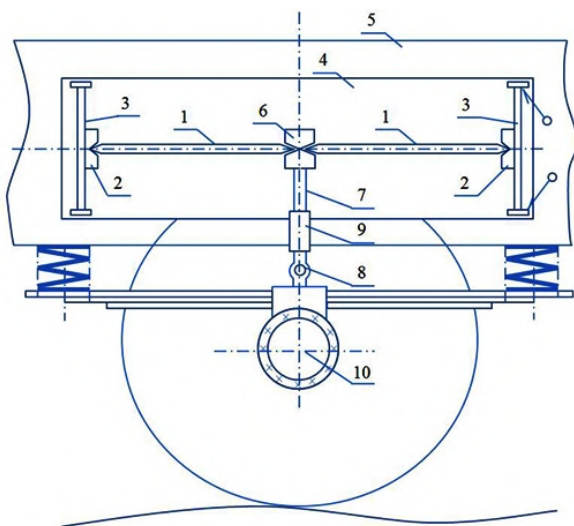


Рис. 2. Конструктивная схема модернизированного рессорного подвешивания

зонтальном положении необходимой упругой силы и защитного хода устройства.

Призматическая поверхность опоры позволяет совершать ножу при установке и ремонте максимальные угловые перемещения. Угол между сторонами соответствует $45-90^\circ$.

Ножевые опоры относятся к опорам с трением качения, так как при колебательном движении ножа на небольшой угол порядка $8-10^\circ$ его рабочая кромка перекачивается по поверхности опоры практически без скольжения.

Рабочая грань ножа призмы — это цилиндрическая поверхность малого радиуса (от 0,5 до 10 мм), выбирается в зависимости от расчетной горизонтальной силы и контактных напряжений.

Из научной литературы [3–5] известно, что основным достоинством ножевой опоры являются ничтожно малые момент трения и износ. Материалом для ножей и подушек для больших нагрузок, достигающих 250 кГс на 1 погонный миллиметр

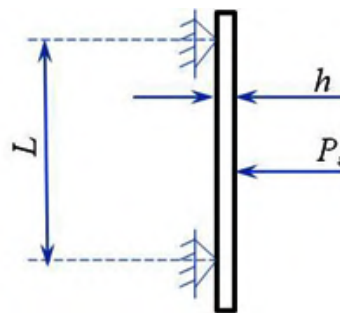


Рис. 3. Расчетная схема рессоры

кромки ножа, при радиусе кромки 0,5 мм используется стали X18 и ЭИ515, закаленные до высокой степени твердости [6–8]. Они обладают высокой износостойкостью и высокими антикоррозийными свойствами. Подушки рекомендуется выполнить из материала более твердого, чем материал ножа, так как при износе легче заменить нож, чем подушку. Кроме того, повреждение рабочей поверхности подушки значительно увеличивает трение и выводит опоры из строя. Снятие рабочей кромки ножа не влечет за собой заметного увеличения момента трения.

Нож и подушка опор в конструктивном решении крепятся к стержням и рессорам запрессовкой или винтами.

Работает устройство следующим образом: при перемещении колесной пары по неровностям пути тяга — 7 совершает вертикальные перемещения вверх или вниз, выводя стержни — 1 из среднего горизонтального положения.

В связи с этим в упругом силовом блоке возникают вертикальные усилия направленные также вверх или вниз против сил, действующих со стороны пути на основное рессорное подвешивание. Величина вертикальных усилий зависит от амплитуды неровностей пути и конструктивных параметров силового механизма. Таким образом, суммарная силовая характеристика $P_{\Sigma} = f(y)$ и обеспечивается эффект виброзащиты.

Методика расчета конструктивных параметров устройства приведена на примере установки его на электровозе ВЛ10. Силовая характеристика $P_y = f(y)$ имеет зависимость

$$P_y = 2 \mathcal{J}_y \left(1 - \frac{\sqrt{l^2 - b^2}}{\sqrt{l^2 - x^2}} \right) x, \quad (1)$$

где $\mathcal{J}_y$ — жесткость неподвижных опор;

l — длина стержней с ножевыми опорами;

b — максимальный ход устройства;

$b \leq x \leq 0$ — перемещение подвижных опор от среднего статического положения до крайнего верхнего или нижнего.

Из множества параметров, обеспечивающих силовую характеристику $P_{\Sigma} = f(y)$, выбирают из условия компоновки и работоспособности по допустимым напряжениям неподвижных упругих рессор и ножевых опор.

Работа упругой рессоры аналогична работе эквивалентной схемы расчетной балки на двух опорах (рис. 3).

Расчет параметров рессоры по допускаемым напряжениям производится согласно схеме расчетной балки на двух опорах.

Параметры L , h и b выбираются из условия удовлетворения требованиям

$$\sigma = \frac{P_z \cdot h}{4W} \leq [\sigma]_4, \quad (2)$$

где P_z — горизонтальная сила в устройстве (определяется $P_z = j_y \cdot f$, где $f = 1 - \sqrt{l^2 - b^2}$ — максимальный прогиб рессоры);

l — длина упругой рессоры;

$W = \frac{c \cdot h^2}{6}$ — момент сопротивления сечения балки;

h и c — толщина и ширина сечения;

$[\sigma]_4 = 75 \text{ кГс/мм}^2$ — для стали 60С2ХФА.

Выбор параметров L , h и b , обеспечивающих зависимость (2) должен быть осуществлен в соответствии с зависимостью для расчетной схемы (рис. 3)

$$f = \frac{P_z \cdot L^3}{48E \cdot J}, \quad (3)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кГс/мм}$ — модуль упругости стали;

$J = \frac{c \cdot h^3}{3} \text{ мм}^4$ — момент инерции сечения.

Работоспособность ножевых опор определяется максимальным напряжением на поверхности касания, а также изгибающим напряжением в материале ножа.

Если считать, что радиус закругления поверхности подушки стремится к бесконечности, то максимальное напряжение на поверхности касания ножа и подушки, согласно формуле Герца [3], равна:

$$\sigma_{\max} = 0,59 \sqrt{\frac{P_z}{n \cdot r \left(\frac{1}{E_n} + \frac{1}{E_n} \right)}}, \quad (4)$$

где n — длина рабочей кромки ножа;

r — радиус закругления рабочей кромки ножа;

P_z — горизонтальная сила, действующая на опору и ножи;

E_n и E_n — модули упругости соответственно материала ножа и подушки.

Напряжение в материале ножа не должно превышать $0,3 \text{ Нв кГс/мм}^2$, где Нв — твердость по Бригеллю (для закаленной стали $\approx 200 \text{ кГс/мм}^2$).

Для электровоза ВЛ10 расчетные параметры виброзащитного устройства с ножевыми опорами, обеспечивающие суммарную силовую характеристику $P_\Sigma = f \cdot (P_m + P_y)$, соответствуют следующим значениям:

$l = 200 \text{ мм}$ — длина стержня ножа;

$r = 10 \text{ мм}$ — радиус скругления кромки ножа;

$b = 60 \text{ мм}$ — максимальный ход устройства;

$V = 50 \text{ мм}$ — ширина контактной кромки ножа;

$j_y = 750 \text{ кГс/мм}$ — жесткость рессоры;

$L = 250 \text{ мм}$ — длина рессоры;

$H = 20 \text{ мм}$ — толщина рессоры;

$c = 50 \text{ мм}$ — ширина рессоры.

Библиографический список

1. Пат. 2559397 С2 РФ, МПК В 61 F 5/02. Устройство для уменьшения колебаний пассажирского вагона / Савельев Ю. Ф., Шевченко В. Я, Симак Н. Ю., Кожухметов А. И. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения ; опубл. 20.06.2015, Бюл. № 22. — 5 с.
2. Пат. 2270118 С2 РФ, В61F 5/06. Устройство для уменьшения колебаний грузового вагона. / Галиев И. И., Савельев Ю. Ф., Нехаев В. А., Шевченко В. Я., Симак Н. Ю. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения ; опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5. — 5 с.
3. Нестеренко, А. Д. Детали и узлы приборов (Расчет и конструирование) / А. Д. Нестеренко. — Киев : Гос. изд-во техн. лит., 1981. — С. 148—150.
4. Теория механизмов и машин / Под ред. К. В. Фролова. — М. : Высшая школа, 1987. — 496 с.
5. Левитский, Н. И. Колебания в машинах : учеб. пособие для вузов / Н. И. Левитский. — М : Наука, 1988. — 336 с.
6. Штейнвольф, Л. И. Динамические расчеты машин и механизмов / Л. И. Штейнвольф. — М., Киев : Машгиз, 1961. — 340 с.
7. Вибрации в технике : справ. В 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К. В. Фролова ; ред. совет: В. Н. Челомей [и др.]. — М. : Машиностроение, 1981. — 456 с.
8. Силовой расчет, уравнивание, проектирование механизмов и механика манипуляторов : учеб. пособие / И. Н. Чернышева [и др.] ; под ред. А. К. Мусатова. — М. : Изд-во МГТУ, 1990. — 80 с.

САВЕЛЬЕВ Юрий Федорович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики.

СИМАК Надежда Юрьевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики.

Адрес для переписки: gonad@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2016 г.

© Ю. Ф. Савельев, Н. Ю. Симак

Книжная полка

Технология машиностроения. Лабораторный практикум : учеб. пособие / А. В. Коломейченко [и др.]. — СПб. : Лань, 2015. — 272 с. — ISBN 978-5-8114-1901-2.

В учебном пособии приведено содержание возможных лабораторных работ, в которых нашли отражение вопросы устройства, наладки и эксплуатации основных типов универсальных и специальных металлорежущих станков, автоматов и полуавтоматов, наиболее широко используемых в машиностроении при изготовлении различных деталей. Представленные в учебном пособии материалы позволяют овладеть методиками расчета тепловых деформаций инструмента в процессе резания и разработки технологических процессов сборки изделий и механической обработки деталей. Практические знания, полученные студентами, будут использоваться ими при выполнении инженерных работ разного уровня сложности.

Учебное пособие предназначено для студентов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению «Машиностроение». Может использоваться для самостоятельной работы студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов. Представляет интерес для инженерно-технических работников, преподавателей и аспирантов технических вузов.

ОЦЕНКА ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СТРУЙНЫХ ПРИНТЕРОВ

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к воспроизведению цветных изображений струйными принтерами. Рассматриваются критерии оценки цветовоспроизведения, в частности, цветовой охват. Приводятся результаты оценки цветового охвата девяти систем печати «струйный принтер — бумага» с использованием различных технологий оценки. Показаны особенности цветовоспроизведения современных моделей струйных принтеров.

Ключевые слова: струйная печать, струйные принтеры, система печати, цветовой охват, объем тела цветового охвата.

Под цифровой печатью понимают печать с помощью устройств, печатающих при непосредственной передаче данных из компьютера. Среди технологий цифровой печати одно из ведущих мест занимает технология струйной печати.

Качество цифровой печати оценивают по значительному количеству показателей: оптическая плотность фона, равномерность печати, оптическая плотность изображения, градационная передача, разрешение печати, разрешающая способность и др.

Особое значение имеет оценка цветовоспроизведения. Качество цветовоспроизведения — один из основных показателей качества печати цветного принтера. В этой связи исследования в области цветовоспроизведения в цифровой печати являются актуальными.

Цель настоящего исследования — комплексная оценка цветовоспроизведения струйных принтеров при печати на различных бумагах.

Стандартная методика оценки цветового охвата заключается в оценке площади шестиугольника, отображенного на диаграмме цветности a^*b^* колориметрической системы CIE $L^*a^*b^*$ -1976.

Вершинами шестиугольника являются точки основных цветов субтрактивного синтеза (голубой, пурпурный, желтый) и точки цветов, образующихся при их попарном наложении (синий, зеленый, красный) [1].

Описанная методика является неточной. Цвет величина трехмерная, и оценивать цветовой охват плоскими, двухмерными графиками некорректно, так как тело охвата цветов является объемным. В [2–4] показано, что точной характеристикой цветового охвата цветовоспроизводящей системы является объем тела цветового охвата, который является оценкой количества воспроизводимых цветов. Конфигурацию тела цветового охвата можно наглядно представить с помощью набора сечений тела

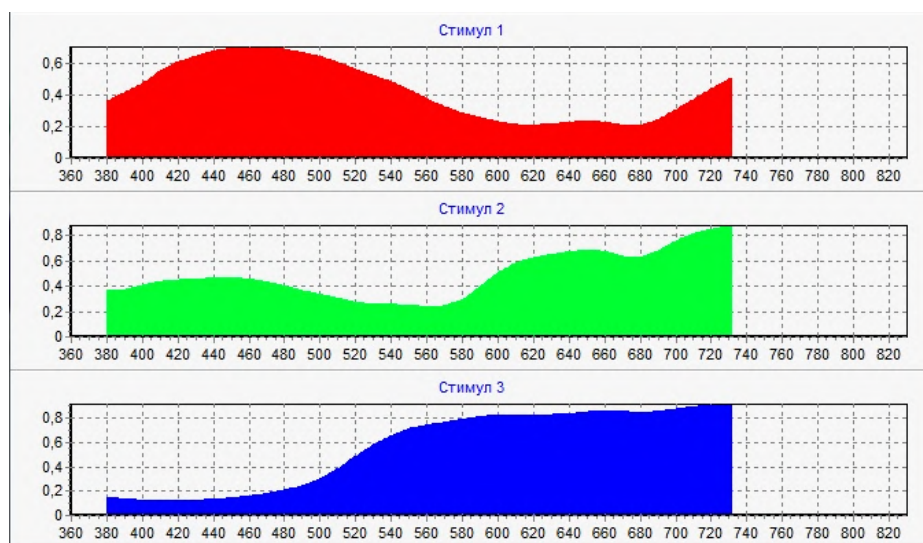


Рис. 1. Кривые спектрального отражения полей тестовой шкалы IT-8 голубой (стимул 1), пурпурной (стимул 2) и желтой (стимул 3) красок системы печати «HP Photo smart B103 — глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy»

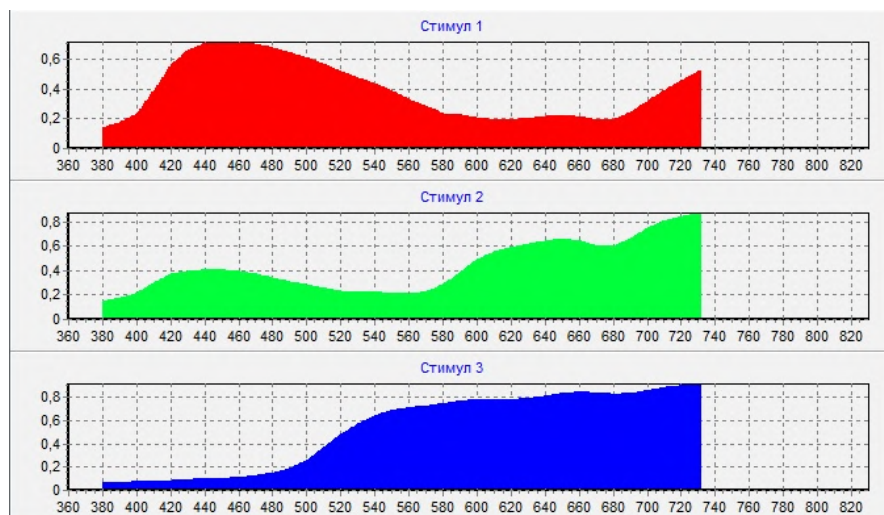


Рис. 2. Кривые спектрального отражения полей тестовой шкалы IT-8 голубой (стимул 1), пурпурной (стимул 2) и желтой (стимул 3) красок системы печати «HP Photo smart B103 — матовая бумага Xerox Colortech+ iGen 3»

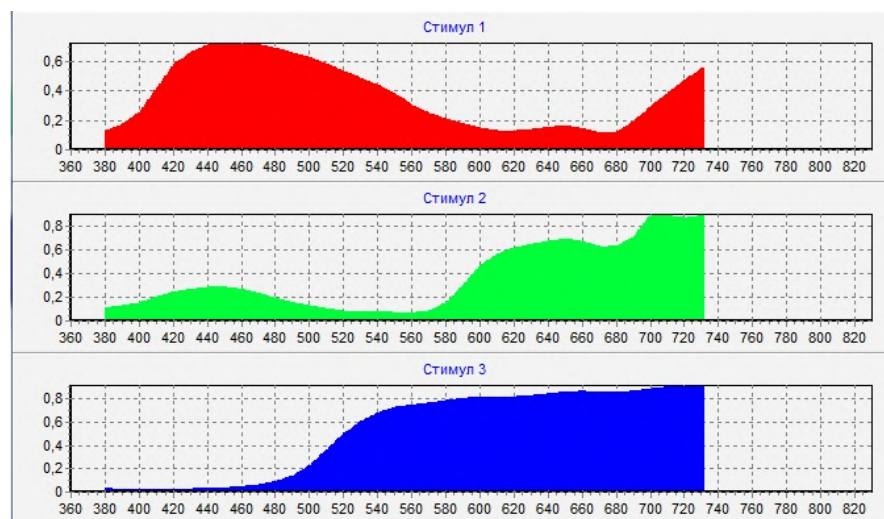


Рис. 3. Кривые спектрального отражения полей тестовой шкалы IT-8 голубой (стимул 1), пурпурной (стимул 2) и желтой (стимул 3) красок системы печати «HP Photo smart B103 — фотобумага бумага Lomond Glossy inkjet Photo paper»

плоскостями, параллельными плоскости a^*b^* при различных значениях L^* .

В Омском государственном техническом университете разработаны и апробированы метод, алгоритм и программа (Project1) для расчетов объема тела охвата цветов систем печати [3, 5]. Программа Project1 рассчитывает объем тела цветового охвата и координаты цвета a^* , b^* , необходимые для построения сечений тела, плоскостями, параллельными плоскости a^*b^* при различных значениях параметра L^* .

Для выполнения указанных расчетов необходимо измерить спектральные характеристики отражения красок субтрактивного синтеза: голубой, пурпурной и желтой — значения коэффициента отражения на интервале длин волн видимого диапазона спектра (380–780 нм) через каждые 10 нм. Подготовленные во вспомогательном файле Excel данные импортируются в программу Project1, где выполняются построения спектральных кривых

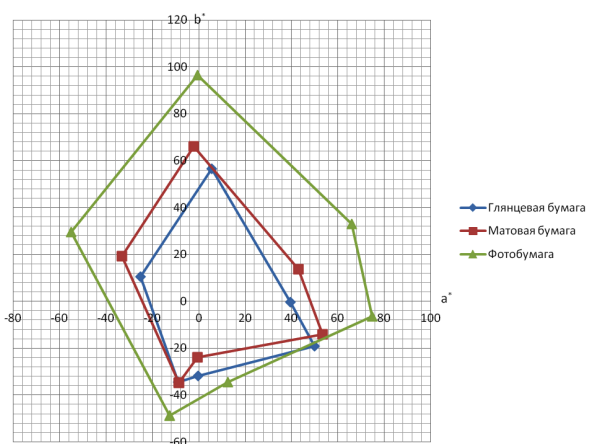
отражения для трех стимулов субтрактивного синтеза (подобные изображенным на рис. 1–3), рассчитывается объем тела цветового охвата и данные, необходимые для построения набора сечений тела охвата цветов.

Для проведения исследований были отобраны современные модели струйных принтеров ведущих мировых производителей (Epson, Canon, HewlettPackard) и проведены исследования девяти систем струйной печати: «струйный принтер — бумага».

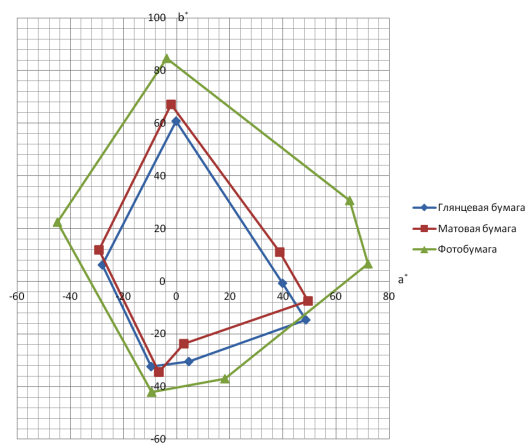
На выбранных моделях принтеров были получены на различных бумагах распечатки тестовой шкалы IT-8, проведены спектрофотометрические измерения, рассчитаны объемы тела охвата цветов (табл. 1, для сравнения — объем тела охвата цветов идеального субтрактивного синтеза — 250 000 единиц ΔE_{00}), построены отображения тел цветового охвата по чистым цветам (рис. 4–6) и построены сечения тел цветового охвата (рис. 7–9).

**Характеристика цветового охвата
систем печати «струйный принтер–бумага»**

Печатающее устройство	Подложка	Объем тела охвата цветов, ΔE_{00}
Принтер Epson L 800	Глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy	38395
	Матовая бумага Xerox Colortech+ iGen 3	44653
	Фотобумага Lomond Glossy inkjet Photo paper	70806
Принтер Canon Pixma IP 7240	Глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy	42585
	Матовая бумага Xerox Colortech+ iGen 3	46387
	Фотобумага Lomond Glossy inkjet Photo paper	74008
Принтер HP Photo smart B 109	Глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy	38496
	Матовая бумага Xerox Colortech+ iGen 3	43293
	Фотобумага Lomond Glossy inkjet Photo paper	74898



**Рис. 4. Диаграмма цветности $a^* b^*$ с шестиугольниками
цветового охвата систем печати на базе принтера
Epson L 800:**
глянцевая бумага — Lomond Color Laser paper DS Glossy;
матовая бумага — Xerox Colortech+ iGen 3;
фотобумага — Lomond Glossy inkjet Photo paper



**Рис. 5. Диаграмма цветности $a^* b^*$ с шестиугольниками
цветового охвата систем печати на базе принтера Canon Pixma IP 7240:**
глянцевая бумага — Lomond Color Laser paper DS Glossy;
матовая бумага — Xerox Colortech+ iGen 3;
фотобумага — Lomond Glossy inkjet Photo paper

В результате проведенных исследований установлено:

1. Цветовой охват исследованных систем печати на базе струйных принтеров Epson L 800, Canon Pixma IP 7240, HP Photo smart B 109 составляет 38 000–75 000 ед. ΔE_{00} (табл. 1). Это невысокий показатель — менее 30 % от максимально возможного.

2. Для систем печати на базе струйных принтеров характерна значительная зависимость цветового охвата от типа применяемой бумаги.

Это подтверждается спектральными характеристиками основных стимулов субтрактивного синтеза (рис. 1–3, системы печати на базе принтера HP

Photo smart B 109 с тремя различными бумагами), а также шестиугольниками цветового охвата по чистым цветам (рис. 4–6).

Системы печати, в которых используются универсальные бумаги — глянцевая бумага марки Lomond Color Laser paper DS Glossy и матовая бумага марки Xerox Colortech+ iGen 3 — имеют цветовой охват в 1,5–2 раза меньше согласно полученным значениям объема тела цветового охвата (табл.). Системы печати, в которых используется специально разработанная для струйной печати бумага для печати изображений с фотографическим качеством — Lomond Glossy inkjet Photo paper, обеспечивают наибольший цветовой охват (табл. 1

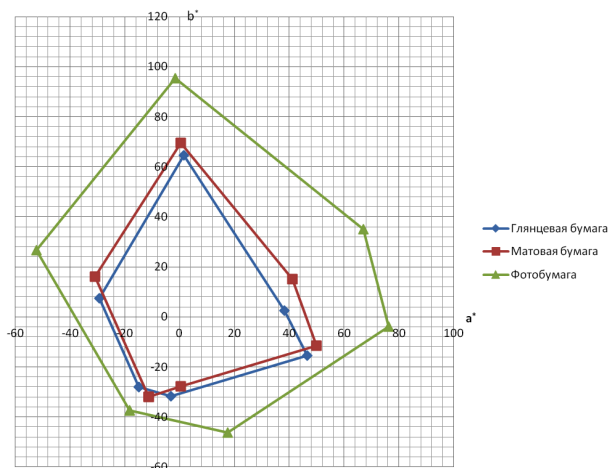


Рис. 6. Диаграмма цветности a^*b^* с шестиугольниками цветового охвата систем печати на базе принтера HP Photo smart B103: глянцевая бумага — Lomond Color Laser paper DS Glossy; матовая бумага — Xerox Colortech+ iGen 3; фотобумага — Lomond Glossy inkjet Photo paper

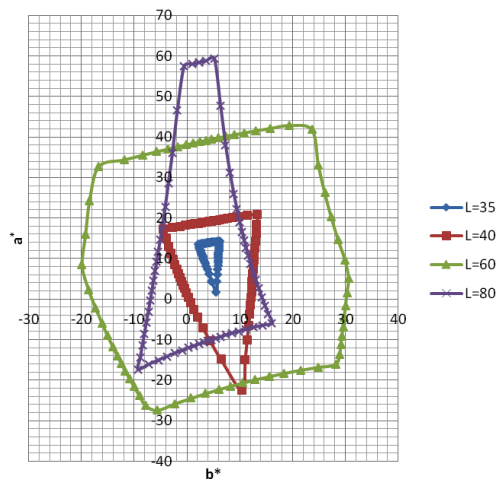


Рис. 7. Диаграмма цветности a^*b^* с набором сечений тела цветового охвата системы печати «HP Photo smart B103 — глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy»

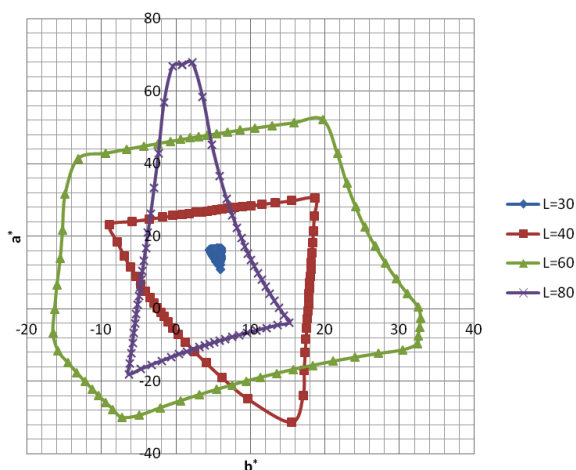


Рис. 8. Диаграмма цветности a^*b^* с набором сечений тела цветового охвата системы печати «HP Photo smart B103 — матовая бумага Xerox Colortech+ iGen 3»

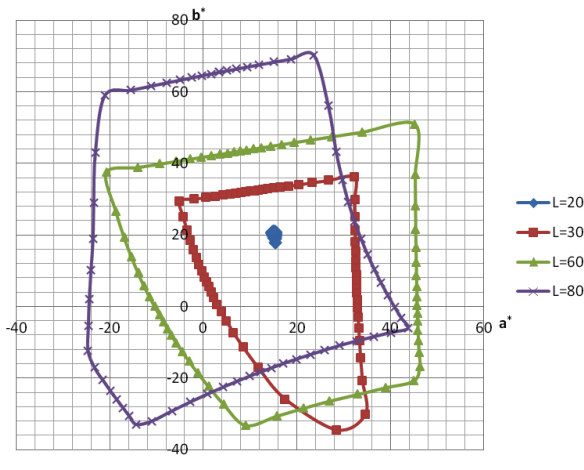


Рис. 9. Диаграмма цветности a^*b^* с набором сечений тела цветового охвата системы печати «HP Photo smart B103 — фотобумага Lomond Glossy inkjet Photo paper»

и рис. 4–6, на которых шестиугольники цветового охвата по чистым цветам для указанной бумаги намного превосходят по площади аналогичные шестиугольники цветового охвата при печати на других бумагах). Это также наглядно представлено на диаграммах цветности a^*b^* с наборами сечений тела цветового охвата систем печати на базе принтера HP Photo smart B 109 (рис. 7–9).

3. Наибольший цветовой охват обеспечивает принтер HP Photo smart B 109 при печати на фотобумаге Lomond Glossy inkjet Photo paper.

4. Наименьший цветовой охват имеет система печати «принтер Epson L 800 — глянцевая бумага Lomond Color Laser paper DS Glossy».

5. Для исследованных систем струйной печати характерен проблемный синий цвет (голубая + + пурпурная краски). На диаграммах цветности a^*b^* шестиугольник цветового охвата вырождается в пятиугольник или имеет ярко выраженную вогнутую форму. Только у двух систем печати из девяти шестиугольник цветового охвата по чи-

стым цветам имеет классическую шестиугольную форму (рис. 4–6).

6. Основные цвета субтрактивного синтеза — голубой, пурпурный, желтый — наилучшим образом воспроизводятся принтером HP Photo smart B 109 (рис. 4–6), что следует из положения точек указанных цветов на диаграммах цветности a^*b^* : они расположены наиболее близко к точкам соответствующих идеальных цветов субтрактивного синтеза.

Библиографический список

1. Шашлов, Б. А. Цвет и цветопроизводство / Б. А. Шашлов. — М.: Мир книги, 1995. — 286 с.
2. Пожарский, А. О. Оценка цветового охвата системы печати посредством объема тела охвата цветов, вычисленного с использованием уточненных функций цветовых различий / А. О. Пожарский, И. А. Сысоев // Омский научный вестник. — 2005. — № 4 (33). — С. 180–182.
3. Пожарский, А. О. Оценка цветового охвата системы печати посредством объема тела охвата цветов, вычисленного с

учетом неоднородности цветового пространства / А. О. Пожарский, И. А. Сысуев // Известия вузов. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2006. — № 4 (октябрь—декабрь). — С. 3—12.

4. Сысуев, И. А. Комплексная оценка цветового охвата цветовоспроизводящих систем / И. А. Сысуев, А. О. Пожарский, А. А. Захаренко // Омский научный вестник. — 2006. — № 9 (47). — С. 107—110.

5. Свидетельство о регистрации № 50200601138. Вычисление объема тела охвата по базовым точкам его поверхности / Пожарский А. О., Пожарский Т. О., Сысуев И. А. — М.: ГКЦИТ ОФАП, 2006.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Обо-

рудование и технологии полиграфического производства».

КОБЕНКО Екатерина Александровна, магистрант гр. ТПм-141 факультета элитного образования и магистратуры.

ФЕДОРЧУК Марина Федоровна, магистрант гр. ТПм-151 факультета элитного образования и магистратуры, ведущий инженер научного издательства.

Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2016 г.

© И. А. Сысуев, Е. А. Кобенко, М. Ф. Федорчук

УДК 655.3.06

**И. А. СЫСУЕВ
Н. Н. КОЗИНА**

**Омский государственный
технический университет**

ОЦЕНКА ВОСПРИЯТИЯ ПЕЧАТНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА БЕЛОЙ И ЦВЕТНЫХ ПОДЛОЖКАХ

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к созданию привлекательного внешнего облика регулярных страниц печатных публикаций. Приводятся данные, относящиеся к восприятию графического образа страниц с различным контрастом. Выполнена оценка восприятия печатных публикаций, выполненных на белой и цветных подложках. Анализируется связь ранга экспертной оценки с контрастом графического образа страниц, в том числе с учетом цвета подложки.

Ключевые слова: графический образ страницы, печатные публикации, насыщенность текстового набора, контраст, цветная подложка.

Оформление печатных и электронных публикаций предполагает соблюдение технических правил набора и верстки текста и нетекстовых элементов (графики и иллюстраций) на полосе набора (в пределах действенной зоны экрана). Однако поминного этого дизайн страниц (печатных или электронных изданий) должен быть выполнен таким образом, чтобы текст был удобочитаемым, а внешний графический облик страниц — привлекательным. Многочисленные исследования в этой области, например [1—2], показывают, что восприятие текстовой информации читателем (пользователем) во многом зависит от графического дизайна (типографики). Одной из важнейших характеристик оценки внешнего облика страницы является контраст. Публикации, оформленные с высоким контрастом графического облика страницы, вызывают у читателя (пользователя) наиболее благоприятное впечатление.

Черный текст, отпечатанный (расположенный) на белой бумаге (белом фоне) — наиболее часто встречающийся вариант оформления — создает некоторый оттенок серого цвета. Этот оттенок серого цвета зависит как от рисунка (графики) шрифта,

его кегля, насыщенности и пропорциональности, так и от параметров текстового набора, таких как интерлиньяж и величина трекинга. В [3] было предложено использовать для оценки указанного оттенка серого цвета такой показатель, как насыщенность текстового набора.

Очевидно, что рассматриваемый оттенок серого цвета является результатом восприятия — усреднения совокупной площади черных элементов графики шрифта и площади белого пространства, в которое помещен текстовый набор. В силу этого насыщенность текстового набора как показатель оттенка серого цвета не может быть измерена с использованием аппаратных средств (апертура измерительных приборов имеет порядок квадратных миллиметров, а площадь текстового набора — порядок квадратных дециметров).

В 2009 г. в Омском государственном техническом университете был разработан программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора [3, 4] с использованием инструментальной программы для обработки изображений Adobe Photoshop. Насыщенность текстового

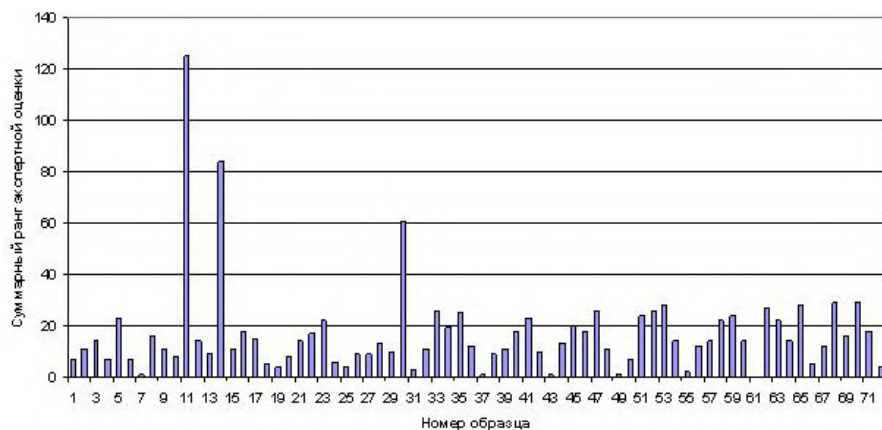


Рис. 1. Результаты экспертной оценки восприятия регулярных страниц печатных публикаций, выполненных на белой бумаге: тестовые образцы № 11 (контраст 58 ед. ур. ярк.), 14 (47), 30 (60) имеют наивысшие суммарные ранги (соответственно 125, 84, 61)

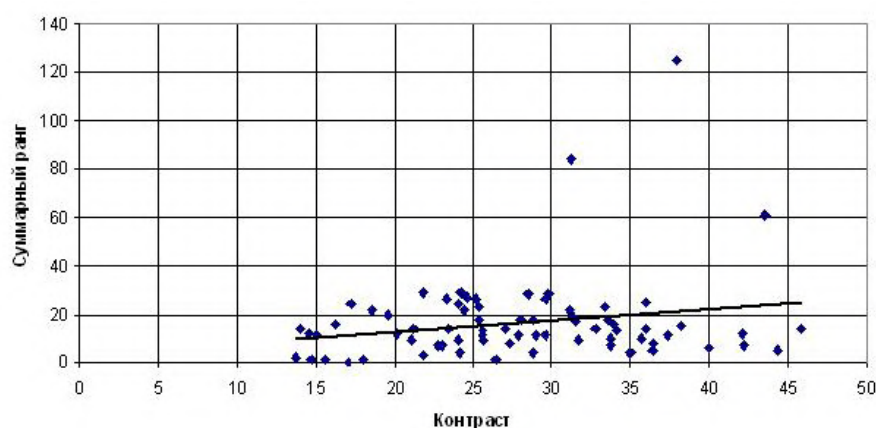


Рис. 2. Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста. Печатная публикация на белой бумаге

Таблица 1

Цветовые характеристики бумаги

№ п/п	Марка бумаги, плотность (г/м ²)	Цвет	Координаты цвета		
			L*	a*	b*
1	Svetocopy (80)	Белый	99,70	−0,35	2,96
2	Maestro color, серия neon (80)	Оранжевый	87,46	35,00	75,11
3	Maestro color, серия neon (80)	Зеленый	95,55	−40,85	81,69
4	Maestro color, серия neon (80)	Желтый	96,32	−23,55	90,62
5	Maestro color, серия neon (80)	Розовый (светлый пурпурный)	86,87	52,80	12,11

набора предложено характеризовать показателем уровня яркости, который имеет 256 (0 – 255) градаций и предназначен для описания оттенка серого цвета черно-белого изображения, описанного в 8-битовом режиме. Для получения значения указанно-

го показателя изображение текста импортируют в программу Photoshop, выделяют статистически значимую произвольную прямоугольную область (площадью не менее 100 000 пикселей) и производят ее размытие с использованием фильтра

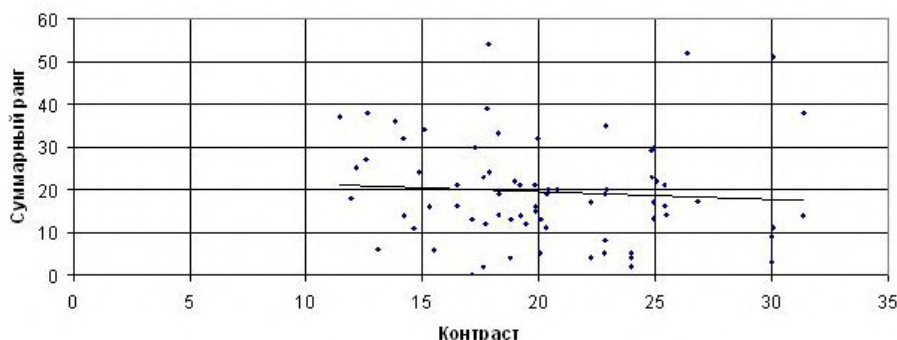


Рис. 3. Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста.
Печатная публикация на оранжевой бумаге

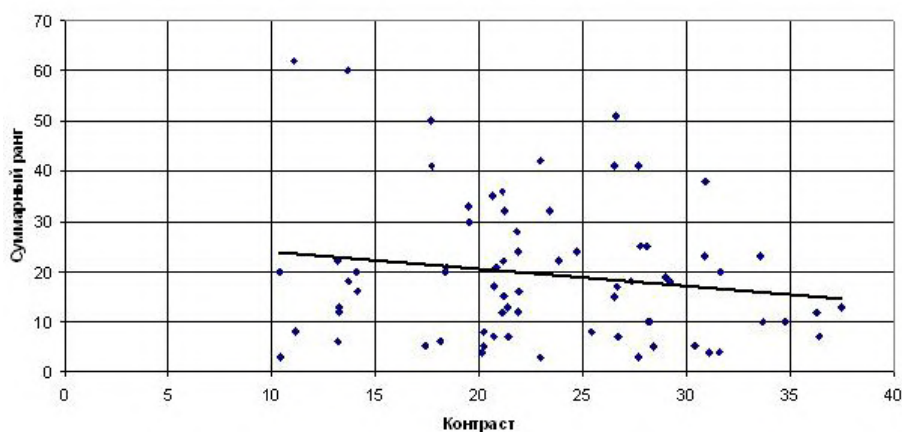


Рис. 4. Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста.
Печатная публикация на зеленой бумаге

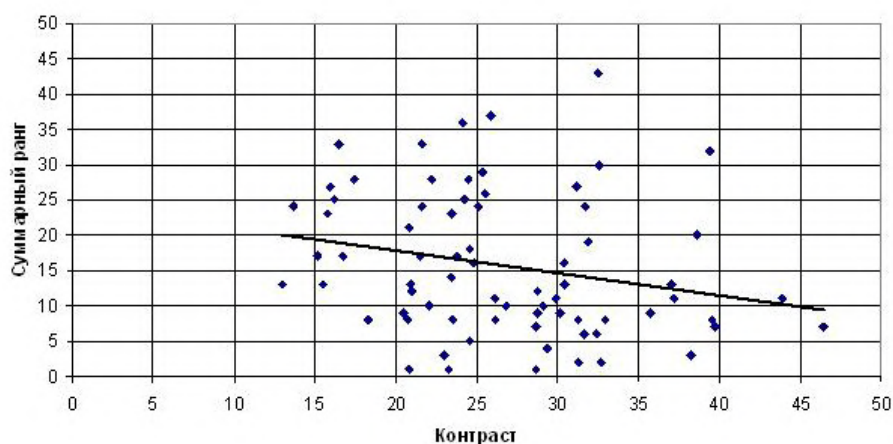


Рис. 5. Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста.
Печатная публикация на желтой бумаге

«Размытие» — «Среднее». Значение уровня яркости («Среднее») полученного однородного оттенка серого цвета выделенной области производят в окне инструмента «Гистограмма». Модернизированный метод [5] предполагает импорт изображения текста в 24-битовом режиме с использованием цветовой модели RGB. Это позволяет оценивать насыщенность текстового набора для текстов с произвольными цветами символов и подложки (фона).

В традиционном варианте оформления текстовых документов (черный цвет символов шрифта, белый цвет подложки (фона)) контраст графиче-

ского образа регулярной страницы определяется соотношением размеров черного, серого и белого пространств, составляющих знаково-графическую композицию. Серое пространство, формируемое основным текстом, имеет наибольший объем. Черное пространство формируется высоко насыщенными шрифтами, графикой и иллюстрациями. Белое пространство формируется различного рода пробелами (отбивками, отступами, спусками и т.п.) и полями.

Регулярная страница текста содержит только основной текст, и ее контраст минимален. Наибольший интерес представляют регулярные страницы,

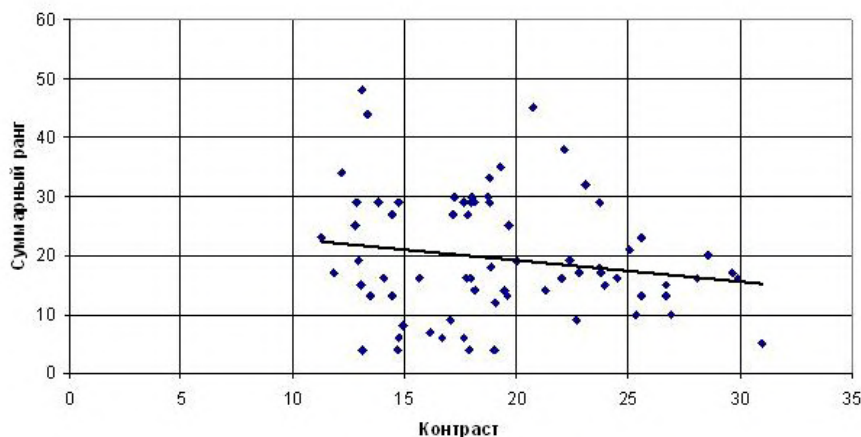


Рис. 6. Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста.
Печатная публикация на розовой (светло-пурпурной) бумаге

содержащие помимо текста заголовков подраздела произведения. Контраст (K) графического образа такой регулярной страницы определяется разностью насыщенностей (в единицах уровней яркости — ед. ур. ярк.) текстового набора основного текста (H_{om}) и заголовка (H_z).

В [6] приводится методика экспертной оценки для определения оптимального контраста графического образа регулярной страницы печатной публикации. Для достижения статистической достоверности методика предполагает формирование 72 тестовых образцов, набранных гарнитурой содержащей большое количество начертаний (чтобы повысить вариабельность сочетаний), с различным соотношением насыщенности набора основного текста (H_{om}) и заголовка (H_z). Поскольку количество тестовых образцов велико и их одновременное сравнение не представляется возможным, оценку производят в три этапа.

В проведенных исследованиях для набора текстов (основного и заголовков) была использована гарнитура Франклин Готик (Franklin Gothic) различных кеглей и начертаний. Тестовые образцы распечатывались (параметры печати — по умолчанию) на черно-белом лазерном принтере LaserJet Pro 400 на белой бумаге Svetocopy (80 г/м²).

В исследованиях принимало участие 70 экспертов. Рассчитанное значение коэффициента конкордации было равно 0,67 (т. е. согласованность мнений экспертов — высокая).

Полученные данные (рис. 1) таковы: три образца получили высокую оценку экспертов, значительно превышающую оценку остальных. Значение контраста графического образа данных регулярных страниц составляет 47–60 единиц уровней яркости. Тестовые образцы, которые получили наиболее низкие значения оценки (0–10), имеют контраст графического образа страницы печатной публикации 4–8 ед. ур. ярк., а образцы с суммарными рангами (10–30) имеют контраст графического образа страницы 13–30 ед. ур. ярк. [6].

На основании вышесказанного оптимальный контраст графического образа страницы печатных публикаций, выполненных на белой бумаге, должен составлять 50–60 единиц уровней яркости.

Зависимость суммарного ранга экспертной оценки от контраста для печатных публикаций, выполненных на белой бумаге, представлена на рис. 2.

Полученная зависимость показывает, что имеет место корреляция между контрастом графического образа страницы и рангом экспертной оценки.

Широкий ассортимент дизайнерских бумаг, в том числе цветных (тонируемых), позволяет реализовывать более изысканные дизайнерские решения, чем оформление печатных текстов на белой подложке. При работе с цветными бумагами дизайнеру также необходимо учитывать особенности восприятия печатных текстов. В этой связи были проведены исследования оценки восприятия регулярных страниц печатных публикаций, выполненных на различных по цвету бумагах (табл. 1).

Исследования были выполнены согласно описанной выше методике.

Коэффициент конкордации для группы из 70 экспертов составил соответственно 0,94, 0,94, 0,53, 0,69 для оценки тестовых образцов, выполненных на оранжевой, зеленой, желтой и розовой (светло-пурпурной) бумагах. Полученные зависимости представлены на рис. 3–6.

Для текстовых документов, отпечатанных на цветных подложках, корреляции между контрастом графического образа страницы и рангом экспертной оценки не выявлено. Это означает: цвет бумаги является фактором особого влияния на восприятие печатного текстового документа в отличие от контраста, который определяется на основе яркостных показателей [7]. Следовательно, необходима разработка и исследование дополнительных характеристик графического образа страниц, учитывающих цветовые показатели рисунков символов текста и подложки, на которой он расположен.

Библиографический список

1. Паркер, Р. Как сделать красиво на бумаге / Р. Паркер. — 2-е изд. — М.: Символ-Плюс, 2008. — 336 с.
2. Феличи, Д. Типографика: шрифт, верстка, дизайн / Д. Феличи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 496 с.
3. Сысуев, И. А. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора электронных публикаций / И. А. Сысуев // Динамика систем, механизмов, машин: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск: ОмГТУ, 2009. — С. 327–330.
4. Воробьева, А. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций / А. С. Воробьева, Ю. С. Григорова,

О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимощенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 228–231.

5. Сысуев, И. А. Модернизация программно-инструментального метода оценки насыщенности текстового набора для печатных публикаций, выполненных на цветной подложке / И. А. Сысуев, И. В. Пруд, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко, К. В. Василевич, К. А. Епифанцева, М. Ф. Федорчук // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 216–221.

6. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных и электронных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимощенко, Ю. С. Григорова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 328–331.

7. Сысуев, И. А. Влияние цвета бумаги на насыщенность текстового набора и контраст графического образа страницы

печатных публикаций // И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 1 (137). — С. 107–109.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

КОЗИНА Надежда Николаевна, студентка гр. ТП-141 нефтехимического института.

Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.09.2016 г.

© И. А. Сысуев, Н. Н. Козина

УДК 621.787.539

**Н. А. МАТВЕЕВ
А. П. МОРГУНОВ**

Омский государственный
технический университет

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РЕЦЕПТУРЫ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В производстве резинотехнических изделий одним из главных процессов является разработка рецептуры резиновой смеси. В процессе рецептуростроения все расчетные операции выполняются вручную, что обуславливает их значительную трудоемкость. Задача автоматизации процесса рецептуростроения является актуальной для современных предприятий и решается разработкой и внедрением посредством информационных технологий. Авторами предлагается с помощью разработанного программного обеспечения осуществлять выбор ингредиентов, определяя их количество без влияния субъективного фактора, с высокой точностью и минимальной трудоемкостью, формируя при этом рецептурную базу данных предприятия.

Ключевые слова: база данных, оптимизация, Excel, рецептуростроение.

Основными особенностями развития современной резиновой промышленности являются: расширение областей применения и ассортимента резиновых изделий; ужесточение условий эксплуатации изделий (широкий диапазон температур, увеличенные нагрузки, скорости, эксплуатация в агрессивных средах и т. д.); стремление использовать более дешевые и доступные армирующие материалы, каучуки и ингредиенты при невозможности беспределельного увеличения их ассортимента; необходимость снижения материалоемкости изделий и трудоемкости их изготовления при сохранении качественных показателей [1].

Очевидно, что одновременное выполнение этих требований затруднительно и связано с дополнительными затратами. Особо значительно стоимость изделий возрастает при их производстве для критических условий эксплуатации — для работы в условиях высоко агрессивных сред, при температуре

выше плюс 250 °С или ниже минус 100 °С, так как для этого требуются дорогие каучуки и наполнители [2].

Хотя стоимость комплектующих резиновых изделий в сравнении со стоимостью машин и механизмов, в которых они используются, обычно невелика, сложность замены резиновых деталей часто так высока, что для потребителя является основным показателем.

Для резиновой промышленности это оборачивается увеличением трудоемкости, снижением рентабельности, так как стоимость переработки составляет небольшую долю стоимости изделий.

Заданные свойства резины обеспечиваются наличием необходимых ингредиентов, их количеством и технологией изготовления. Подбор ингредиентов осуществляется на основе их влияния на изменение свойств резины с целью достижения требуемых характеристик [3].

Сложность процесса расчёта рецептур резиновых смесей заключается еще и в том, что постоянно увеличивается номенклатура применяемых ингредиентов. В связи с этим расчёт рецептов без использования современных компьютерных технологий требует значительных затрат времени, что может привести к потере оперативности управления производством [4]. Использование данного программного обеспечения позволяет не только ускорить технологические расчёты, но и констру-

ировать многокомпонентные системы с заданными свойствами — планируемыми физическими свойствами и минимальной себестоимостью.

Из вышесказанного следует, что для разработки конкурентоспособной на рынке резинотехнических изделий продукции необходимо обладать комплексом профессиональных компетенций в области автоматизированного проектирования рецептов резиновых смесей.

Предлагаемое программное обеспечение позволяет определять количественный состав ингредиентов резиновых смесей с реализацией создания базы данных рецептов. Программное обеспечение написано на языке Visual Basic for Applications (VBA) [5]. Выбор языка объясняется тем, что VBA используется в популярной системе Microsoft Office и позволяет совместить как программу для расчета, так и базу данных, выполненную в табличном редакторе Excel.

В программе используются пользовательские формы для создания и редактирования шаблонов рецептов, циклы для расчета значений показателей; реализованы условия, не допускающие некорректный ввод исходных данных. Также имеются элементы управления, упрощающие работу с программой. Для реализации создания базы данных использовались рабочие листы Excel.

Расчет рецепта резиновой смеси включает в себя расчет пяти показателей:

- расчет массовых частей ингредиентов на 100 массовых частей каучука (основной показатель);
- расчет массовых процентов ингредиентов;
- расчет объемных частей ингредиентов;
- расчет объемных процентов ингредиентов;
- расчет массы одной заправки резиновой смеси (в зависимости от применяемого оборудования) — рабочий рецепт.

Исходной информацией для программы является рецепт, заданный в массовых частях компонентов резиновой смеси на 100 массовых частей каучука. Для ввода данной информации необходимо создать индивидуальный шаблон, содержащий определенное количество ингредиентов каждой стадии изготовления резиновой смеси. При составлении рецепта имеется возможность выбора ингредиентов из базы данных, содержащей наименования основных компонентов резиновой смеси.

Для определения всех составляющих рецепта резиновой смеси разработан алгоритм расчета (рис. 1) [6]. Исходные данные поступают в виде чисел.

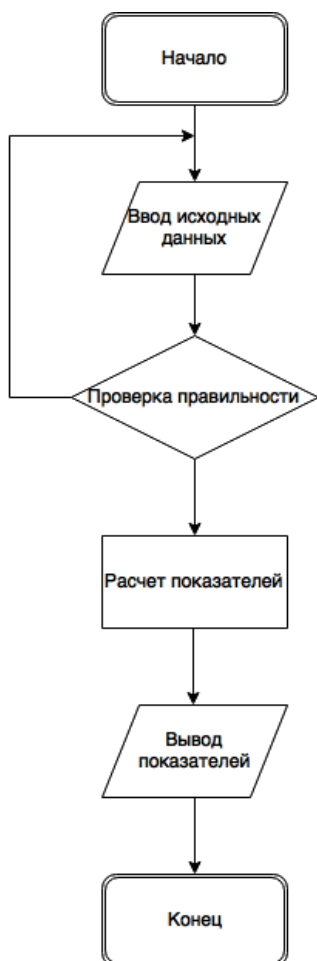


Рис. 1. Блок-схема расчета показателей рецепта резиновой смеси

№ п/п	Наименование ингредиентов	Содержание масс. ч.	Содержание масс. %	Плотность, кг/м³	Объем об. ч. 10³	Об. %	Навеска ингредиентов, кг
1	СКМС-30АРК	100,00	53,91	960,00	104,17	65,72	55,40
2	Регенерат РКТ	10,00	5,39	1200,00	8,33	5,26	5,54
3	Оксид цинка	5,00	2,70	5420,00	0,92	0,58	2,77
4	Стеариновая кислота	1,50	0,81	960,00	1,56	0,99	0,83
5	Техуглерод К-354	35,00	18,87	1800,00	19,44	12,27	19,39
6	Техуглерод П-234	20,00	10,78	1820,00	10,99	6,93	11,08
7	Парафин	3,00	1,62	900,00	3,33	2,10	1,66
8	Мазут	6,00	3,23	900,00	6,67	4,21	3,32
Итого по 1 стадии		180,50	97,30		155,42		100,00
2 стадия							
Маточная смесь							100,00
9	Сера	2,50	1,35	2050,00	1,22	0,77	1,39
10	Альтакс	1,50	0,81	1470,00	1,02	0,64	0,83
11	Нафтам-2	1,00	0,54	1190,00	0,84	0,53	0,55
Итого по 2 стадии		5,00	2,70		3,08		2,77
Итого по рецепту		185,50	100,00		158,50	100,00	102,77
Дата и время создания рецепта		13.09.16	10:47:36				
Последнее изменение							
Оператор							

Страница 1

Создать шаблон для нового рецепта	Изменить шаблон для рецепта
Очистка	Удалить рецепт
Расчет рецепта	Открыть рецепт
Сохранить рецепт	Выход из программы

Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения

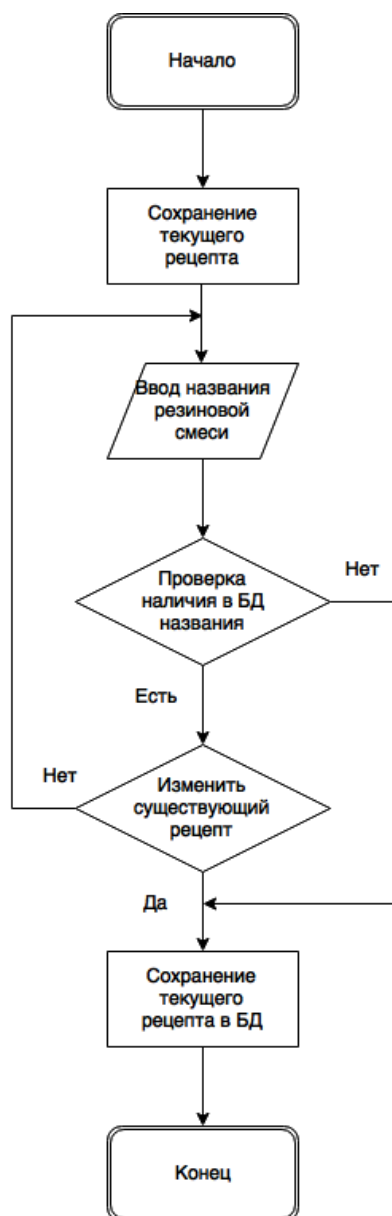


Рис. 3. Блок-схема сохранения рецепта в БД

Главным преимуществом программного обеспечения является наличие макроса, позволяющего осуществлять арифметические операции в программных модулях, упрощая на рабочем листе только результаты расчетов [7].

Панель управления программного обеспечения состоит из функциональных кнопок (рис. 2). Функционал обеспечивает расчет, сохранение, редактирование, выгрузку на рабочий лист существующих рецептов из базы данных (БД).

Алгоритм, отвечающий за сохранение рассчитанного рецепта резиновой смеси в базу данных (рис. 3), упрощает процесс создания нового рецепта. Выгрузка данных существующего рецепта позволяет редактировать рецептуру резиновой смеси, изменяя лишь исходные данные.

Расчет рецептов резиновых смесей с использованием данного программного обеспечения позволит повысить производительность труда в 10 раз и более.

Известны различные пути поиска оптимального соотношения отдельных ингредиентов. Ранее эта

задача решалась путем постановки пассивного эксперимента, заключающегося в последовательном изучении влияния на свойства резин содержания каждого из компонентов в отдельности при фиксированных количествах других. Данный метод связан со значительными затратами времени и материалов, так как на свойства резин оказывает влияние большое количество факторов. Кроме того, полученный результат может и не быть оптимальным из-за наличия эффекта взаимодействия компонентов [1].

Задачи нахождения оптимальных условий часто возникают в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, поэтому к настоящему времени разработаны специальные математические модели, позволяющие получать более обширную информацию о поведении изучаемого объекта, чем при постановке пассивного эксперимента при существенном сокращении необходимого объема экспериментальных данных [8]. В каждом конкретном случае математическая модель создается исходя из целевой направленности объекта, задач исследования и с учетом требуемой точности решения и достоверности исходных данных.

В зависимости от степени изученности процесса, подлежащего оптимизации, построение математической модели может быть осуществлено двумя способами.

Если имеется надежная и достаточная информация о совокупности физико-химических процессов, протекающих в исследуемом объекте, то математическая модель может быть представлена системой алгебраических или дифференциальных уравнений, устанавливающих взаимосвязь между важнейшими параметрами.

Очевидно, подобные модели, связывающие в виде некоторой системы математических уравнений технологические свойства резиновых смесей и механические показатели вулканизатов с составом, а также температурно-временными параметрами изготовления, переработки и вулканизации резин, теоретически существуют.

Однако эти методы пока еще недостаточно разработаны для решения задач оптимизации рецептур резиновых смесей.

Использование разработанного программного обеспечения позволит автоматизировать расчет рецептур резиновых смесей и создать единую рецептурную базу данных предприятия, что позволит снизить трудоемкость процесса расчета и хранения рецептур резиновых смесей и повысить качество выполнения данных операций. Необходимо продолжить разработку программного обеспечения, а именно разработать алгоритм проведения статистической обработки результатов физико-механических испытаний резин с целью определения зависимости влияния ингредиентов на свойства резиновых смесей и разработать математическую модель с целью выявления оптимальных сочетаний ингредиентов.

Библиографический список

1. Основы рецептуростроения эластомерных композиций : учеб. пособие для студентов. В 2 ч. / В. М. Гончаров [и др.]. — Красноярск : СибГТУ, 2002. — Ч. 1. — 84 с.
2. Большой справочник резинщика. В 2 ч. Ч. 2. Резины и резинотехнические изделия / Под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. — М. : Издат. центр «Техинформ» МАИ, 2012. — 648 с.

3. Справочник резинщика. Материалы резинового производства / П. И. Захарченко [и др.]. — М.: Химия, 1971. — 605 с.
4. Rubber Technology. Compounding and Testing for Performance / John S. Dick ; пер. с англ. В. А. Шершнева. — СПб.: Научные основы и технологии, 2010. — 620 с.
5. Гарбер, Г. З. Основы программирования на Visual Basic и VBA в Excel 2007: учеб. пособие для вузов / Г. З. Гарбер. — М.: Солон-Пресс, 2008. — 189 с.
6. Стивен, С. Скиена. Алгоритмы. Руководство по разработке / Стивен С. Скиена. — 2-е изд. — СПб.: БХВ — Петербург, 2011. — 722 с.
7. Роман, С. Использование макросов в Excel / С. Роман. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2004. — 507 с.
8. Красовский, В. Н. Примеры и задачи по технологии переработки эластомеров / В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский, В. М. Харчевников. — Л.: Химия, 1984. — 240 с.

МАТВЕЕВ Никита Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ); инженер научно-производственного предприятия «Прогресс», г. Омск.

Адрес для переписки: nikitamatveev55@gmail.com
МОРГУНОВ Анатолий Павлович, доктор технических наук, профессор (Россия), главный научный сотрудник, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ОмГТУ.

Адрес для переписки: nikitamatveev55@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.08.2016 г.

© Н. А. Матвеев, А. П. Моргунов

УДК 621.9.025

Д. В. ЕМЕЛЬЯНОВ

Набережночелнинский филиал
Казанского национального
исследовательского технического
университета им. А. Н. Туполева,
г. Набережные Челны

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОМОМЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ СВЕРЛЕНИЯ

Рассмотрены и определены изменения силомоментных характеристик в процессе сверления в зависимости от глубины обрабатываемого отверстия. На основании теоретических и практических исследований автором предложен метод проектирования спиральных сверл, жесткость которых меняется по длине сверла. Предложенный метод позволит производительнее вести механическую обработку отверстий, уменьшить количество брака вследствие поломки инструмента, снизить расход режущего инструмента, что, безусловно, является актуальным в современном машиностроительном производстве. **Ключевые слова:** режущий инструмент, спиральные сверла, момент сверления.

Процесс сверления спиральными сверлами сопровождается рядом негативных факторов, которые проявляются при сверлении отверстий, глубина которых располагается в диапазоне $L/d_0 = (3...5)$, где d_0 — диаметр отверстия, а L — его длина. К таким недостаткам можно отнести:

1. Разрушение спирального сверла из-за недостаточной жесткости.
2. Отклонение от круглости отверстия.
3. Увод и непрямолинейность оси отверстия.

Разрушение инструмента происходит в результате увеличения крутящего момента в процессе увеличения обработки глубины отверстия. На границе $L/d_0 = (3...5)$ наибольшие касательные напряжения τ зачастую превосходят допускаемые, в результате чего происходит разрушение. Зная условия прочности [1], можно определить допускаемые силомоментные характеристики при проектировании спирального сверла.

В процессе эксплуатации спиральное сверло испытывает влияние крутящего момента $M_{кр}$ и $P_{ос}$ — осевой силы, а также результирующей радиальной силы, которая возникает на главной режущей кромке (ГРК), в результате чего инструмент испытывает продольные и поперечные деформации, которые в значительной степени влияют на его работоспособность. Влияние осевой силы в значительной степени проявляется при формообразовании сквозных отверстий в тот момент, когда поперечная режущая кромка вышла из материала. В этот момент происходит резкая подача заготовки на инструмент, в результате чего происходит разрушение инструмента.

В работе [2] были получены обобщенные эмпирические формулы для определения силомоментных зависимостей при сверлении:

$$M_{кр} = 8,65D^{2,6} \quad (1)$$

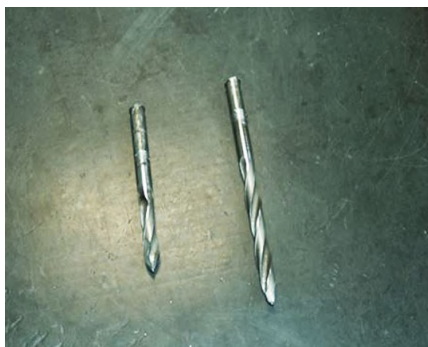


Рис. 1. Фотография разрушения спиральных сверл

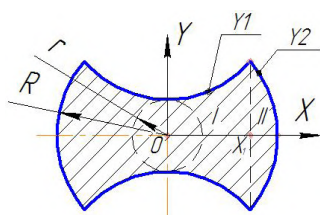


Рис. 3. Профиль поперечного сечения стебля сверла

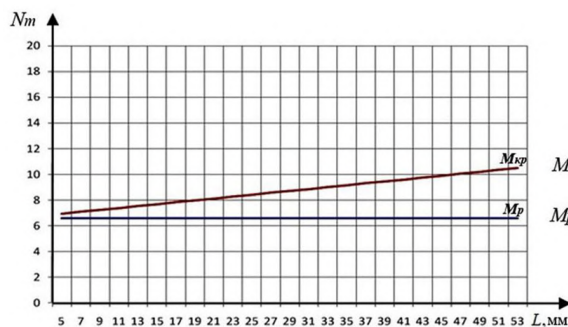


Рис. 2. Изменение крутящего момента при ($D=8,2$ мм, $S=0,2$ мм/об)

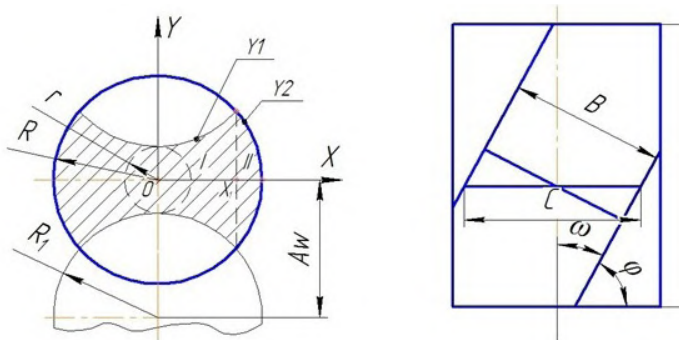


Рис. 4. Профиль для определения момента инерции сверла

$$P_{oc} = 17,6D^2. \quad (2)$$

Нагрузки, рассчитанные по формулам (1) и (2), сверла должны выдерживать без разрушения. Для определения величины разрушающего крутящего момента использовалась формула [3]:

$$M_{kp} = 10,8D^{2,6}, \quad (3)$$

где M_{kp} — крутящий момент резания при сверлении, Нм;

P_{oc} — осевая сила, Н;

D — диаметр сверла, мм.

Известно, что спиральные сверла представляют собой стержень со сложным поперечным сечением формы, который одновременно нагружен сжимающей (осевой) силой и крутящим моментом. При этом нужно понимать, что рост крутящего момента в диапазоне $L/d_0 = (3...5)$ обусловлен движением стружки по стержневым канавкам спирального сверла, в результате чего наибольшие касательные напряжения τ зачастую превосходят допускаемое, в результате чего происходит разрушение (рис. 1).

Из условия прочности известно, что наибольшие касательные напряжения, возникающие в точках сечения у поверхности сверла, не должны превосходить допускаемые, которые выражаются следующей зависимостью [4]:

$$\tau_{max} = \frac{\rho_{max} M_{kp}}{J_p} \leq [\tau], \quad (4)$$

где J_p — момент инерции сечения, мм⁴;

M_{kp} — крутящий момент, Нм;

ρ_{max} — максимальный радиус, мм;

τ_{max} — максимальное результирующее касательное напряжение, МПа.

Крутящий момент равен моменту резания M_p и моменту вызываемому силами трения M_{mp} по длине сверла в процессе обработки отверстия и находится по формуле [5]:

$$M_{kp} = M_p + M_{mp} = 10C_m D^q S^y K_p + 2\pi K \sigma_t r^2 L, \quad (5)$$

где C_m , q , y — коэффициенты для определения момента резания при сверлении;

D — диаметр сверла, мм;

S — подача, мм/об;

K_p — коэффициент, зависящий от механических свойств материала;

σ_t — предел текучести материала, МПа;

L — глубина сверления, мм.

На рис. 2 приведен график изменения крутящего момента в зависимости от глубины обрабатываемого отверстия.

Зная значение максимального результирующего касательного напряжения, можно определить момент сопротивления кручению для любого сечения. Связь между крутящим моментом, действующим на стержень сверла, и максимальными по значению касательными напряжениями, вызываемыми в результате этого момента, определяется моментом сопротивления кручению:

$$W_p = \frac{M_{kp}}{\tau_{max}}, \text{ мм}^3. \quad (6)$$

Результирующее касательное напряжение находим по формуле;

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}, \quad (7)$$

где τ_{zx} и τ_{zy} — касательные напряжения, МПа.

Найдя значение максимального результирующего касательного напряжения, можно определить

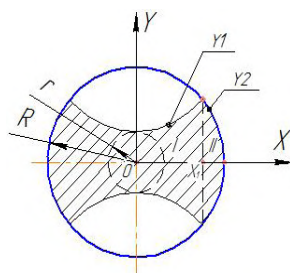
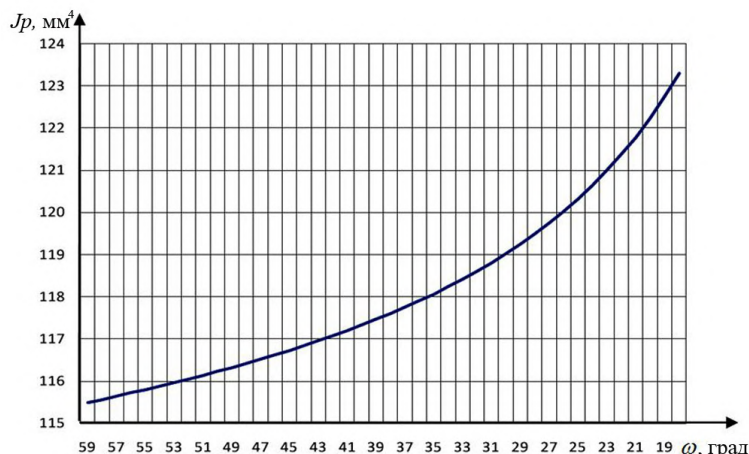


Рис. 5. К определению моментов инерции сечения

Рис. 6. Изменение полярного момента инерции J_p от угла наклона ω

момент сопротивления кручению для сечения, изображенного на рис. 3 [6].

Значительное влияние на работоспособность спирального сверла оказывает действие осевой силы P_{oc} . Учитывая размеры сечения стебля, наличие стружечных канавок, значительную длину стебля по отношению к диаметру, необходимо обеспечить устойчивость сверла при действии на него осевой силы.

Значение разрушающей осевой силы для спирального сверла определяется:

$$P_{oc} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{L^2}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости материала, МПа;

J_{min} — минимальный момент инерции поперечного сечения, мм⁴;

L — длина сверла, мм.

Данная задача решается с определения минимального осевого момента инерции для сечения сложного профиля сверла и связана со значительным объемом вычислений.

Нахождение минимального момента инерции, действующего по одной из осей, представляет некоторую трудность. Это можно объяснить сложностью поперечного сечения стержня сверла (рис. 4), что, в свою очередь, связано с большим объемом производимых вычислений.

Из рис. 4 следует:

C — ширина стружечной канавки в нормальном сечении, мм;

ω — угол наклона винтовой стружечной канавки, рад;

ϕ — угол подъема винтовой стружечной канавки, рад;

Y_1 — функция, описывающая режущую часть фрезы;

Y_2 — функция, описывающая наружный диаметр сверла;

R — радиус сверла, мм;

r — радиус сердцевины сверла, мм;

A_w — межосевое расстояние, мм.

При $\omega = 0$ минимальный момент инерции будет иметь максимальную величину, но в таком случае стружечные канавки будут прямыми и отвод стружки будет достаточно проблематичен. Наклон стружечных канавок под определенным углом, с одной стороны, уменьшает жесткость сверла, с другой —

способствует лучшему отводу стружки. Уменьшение жесткости происходит за счет изменения площади поперечного сечения стебля сверла [7].

Из рис. 4 видно, что при наклоне винтовой стружечной канавки ее ширина в сечении, перпендикулярном оси, увеличивается, тем самым приводит к уменьшению площади поперечного сечения. Ширина канавки находится следующим образом:

$$C = \frac{B}{\cos \omega}, \quad (9)$$

где B — ширина фрезы, мм;

ω — угол наклона винтовой стружечной канавки, рад.

Площадь поперечного сечения определяется по формуле:

$$A = \left(\frac{\left(\frac{R_1}{\cos \omega} \right)^2 - R^2 - y_0^2}{2y_0} \right) x + \frac{x}{2} \sqrt{R^2 - x^2} + \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{x}{R}. \quad (10)$$

При прочностном расчете стержня спирального сверла на продольный изгиб, в первую очередь, необходимо определить минимальный осевой момент инерции J_{min} для данного сечения (рис. 5). Минимальный момент инерции будет относительно оси X , а максимальный относительно Y .

Для определения J_x и J_y необходимо разбить данное сечение на 2 составляющих I и II.

Тогда $J_y = J_{y1} + J_{y2}$, $J_x = J_{x1} + J_{x2}$. Запишем данные выражения так:

$$J_y = J_{y1} + J_{y2} = \int_0^{x1} x^2 dx \int_0^{y1} dy + \int_{x1}^R x^2 dx \int_0^{y2} dy, \quad (11)$$

$$J_{y1} = \int_0^x \left(\left(\frac{R}{\cos} \right)^2 - x^2 \right)^{\frac{1}{2}} x^2 dx, \quad (12)$$

$$J_{y2} = \int_x^R \left(R^2 - x^2 \right)^{\frac{1}{2}} x^2 dx, \quad (13)$$

$$J_x = J_{x1} + J_{x2} = \int_0^{x1} dx \int_0^{y1} y^2 dy + \int_{x1}^R dx \int_0^{y2} y^2 dy, \quad (14)$$

$$J_{x1} = \frac{1}{3} \int_0^x \left(\left(\frac{R}{\cos} \right)^2 - x^2 \right)^{\frac{1}{2}} dx, \quad (15)$$

$$J_{x2} = \frac{1}{3} \int_x^R (R^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} x^2 dx. \quad (16)$$

Для нахождения полярного момента инерции J_p , характеризующего влияние формы и размеров сечения на сопротивляемость сверла при скручивании, воспользуемся следующей зависимостью:

$$J_p = J_y + J_x. \quad (17)$$

Результаты отразим на рис. 6.

Таким образом, в статье предложен метод, дополняющий научную концепцию проектирования спиральных сверл на основе использования закономерностей силомоментных характеристик режущего инструмента, возникающих при сверлении отверстий, а также предложен новый, нетрадиционный, подход для определения момента резания при сверлении в зависимости от глубины обрабатываемого отверстия. Предложенный метод позволит производительно вести механическую обработку отверстий, уменьшит количество брака вследствие поломок режущего инструмента.

Библиографический список

1. Арутюнян, Н. Х. Кручение упругих тел / Н. Х. Арутюнян, Б. М. Абромян. — М. : ГИФМЛ, 1963. — 688 с.
2. Катаев, Ю. П. Пластическое кручение полых элементов летательных аппаратов / Ю. П. Катаев. — М. : Машиностроение, 1985. — 128 с.

3. Исследование напряжений и деформаций в спиральных сверлах / А. Я. Александров [и др.] // Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация : материалы науч.-техн. симп. — М., 1974. — 39 с.

4. Емельянов, Д. В. Конструкция спирального сверла с переменным углом подъема спирали для формообразования отверстий в труднообрабатываемых материалах / Д. В. Емельянов // Инженерный журнал. Справочник с приложением : науч.-техн. и производств. журн. — 2013. — № 3. — С. 31–34.

5. Емельянов, Д. В. Проектирование и производство спиральных сверл переменной жесткости с изменяемым углом наклона стружечных канавок : дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Емельянов. — Казань : Изд-во КНИТУ им. А. Н. Туполева, 2014. — 126 с.

6. Емельянов, Д. В. Проектирование и производство спиральных сверл переменной жесткости : моногр. / Д. В. Емельянов, И. А. Савин. — Курск : ЗАО «Университетская книга», 2016. — 231 с.

7. Хисамутдинов, Р. М. Оценка увода оси отверстия при обработке осевым инструментом с переменным шагом винтовой линии / Р. М. Хисамутдинов, Д. В. Емельянов // Инженерный журнал. Справочник с приложением : науч.-техн. и производств. журн. — 2012. — № 6. — С. 10–13.

ЕМЕЛЬЯНОВ Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии машиностроительных производств.

Адрес для переписки: bk8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2016 г.

© Д. В. Емельянов

Книжная полка

Проектирование металлообрабатывающих инструментов : учеб. пособие / А. Схиртладзе [и др.]. — 2-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2015. — 256 с. — ISBN 978-5-8114-1632-5.

В учебном пособии рассмотрены вопросы организации и проведения курсового проектирования режущего инструмента. Излагаются методики расчета мерного осевого инструмента, специальных видов режущего инструмента; предложены расчеты типовых конструкций деталей. Целью пособия является обучение технологии разработки новых перспективных режущих инструментов, а также формирование навыков системного подхода при решении сложных технических задач.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки в области машиностроения. Книга будет полезна для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования металлообрабатывающих инструментов.

Технология машиностроения. Выпускная квалификационная работа для бакалавров : учеб. пособие / Под ред. Н. М. Султан-заде. — М. : ИНФРА-М; Форум, 2016. — 288 с. — ISBN 978-5-00091-105-1, 978-5-16-011161-2.

В учебном пособии показаны тематика и состав выпускной квалификационной работы, содержание пояснительной записки и графической части. Указания по проектированию технологического процесса механической обработки деталей сопровождаются примерами отработки конструкции деталей на технологичность, выбора технологических баз, типа производства, вида заготовки, построения оптимального маршрута механической обработки и технологических операций, проектирования технологической оснастки. Учтены требования государственных стандартов. Приведен список литературы, рекомендуемой для выполнения проекта.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».