

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

2(67) 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

| | |
|---|----|
| БОЛОТОВ С. В., КУЛИКОВ В. П., ХОМЧЕНКО А. В. Анализ результатов лабораторных испытаний сварочного оборудования | 5 |
| КАРТАШЕВИЧ А. Н., ШАПОРЕВ В. А., ДАРГЕЛЬ Р. С. Влияние газомоторного топлива на эффективные и экологические показатели дизеля | 14 |
| КОЖЕВНИКОВ М. М., ЧУМАКОВ О. А., ШЕМЕНКОВ В. М., ИЛЮШИН И. Э., ЮРКИНА А. А. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки | 21 |
| КОРОТЕЕВ А. О., КУЛИКОВ В. П., ЛУПАЧЕВ А. Г., ЦЫГАНКОВ И. И. Технология импульсно-дуговой сварки тонколистовых корпусных изделий из алюминиевых сплавов Al-Mg-Cu с возвратно-поступательным движением присадочной проволоки..... | 31 |
| ЛИННИК Д. А. Повышение эффективности системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора | 40 |
| ЛИСКОВИЧ М. И. Уравнения для расчета давления прессования при создании покрытия, получаемого совместной вытяжкой | 51 |
| ЛОБИКОВА Н. В., ГАЛЮЖИН С. Д., ЛОБИКОВА О. М. Гидравлический расчет системы удаления конденсата вентиляционной установки | 60 |

| | |
|--|----|
| ЛУСТЕНКОВА Е. С., МЕТЕЛИЦА Я. Н., МОИСЕЕНКО А. Н. Моделирование плоскоконического роликового зацепления в системах NX и MSC.ADAMS..... | 68 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| ХОМЧЕНКО А. В., БОЛОТОВ С. В., ШУЛЬГА А. В. Контроль параметров и анализ средств индивидуальной защиты глаз сварщика..... | 78 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| ШАТУРОВ Д. Г., ШЕЛЕГ В. К. Исследование влияния скорости резания на триботехнические характеристики процесса точения твердосплавным инструментом..... | 88 |
|--|----|

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

| | |
|--|----|
| КИСЕЛЁВ М. Г., МОНИЧ С. Г., ПЕТРОВ В. А., АХМАД АЛИ Влияние продолжительности остановки шток-поршня шприца однократного применения перед стадией выдавливания жидкости на величину усилия, необходимого для его перемещения..... | 97 |
|--|----|

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

| | |
|---|-----|
| КОВАЛЬ А. С., КОНДРАТЕНКО А. Г. Модель в среде МАТЛАБ накопителя энергии на базе суперконденсатора и двухуровневого повышающе-понижающего преобразователя DC/DC..... | 106 |
|---|-----|

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

| | |
|--|-----|
| САМАРЦЕВ С. Б. Рефлексия парадигмы непрерывного образования в Университете 3.0..... | 113 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| ТОКМЕНИНОВ К. А. Некоторые направления перспективного развития промышленных предприятий в Республике Беларусь..... | 123 |
|---|-----|

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142*

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

| | |
|---|----|
| BOLOTOV S. V., KULIKOV V. P., KHOMCHENKO A. V. Analysis of welding equipment laboratory test results | 5 |
| KARTASHEVICH A. N., SHAPOREV V. A., DARGEL R. S. Influence of gas-motor fuel on the effective and environmental performance of diesel engines | 14 |
| KOZHEVNIKOV M. M., CHUMAKOV O. A., SHEMENKOV V. M., ILUSHIN I. E., JURKINA A. A. Trajectory optimization of industrial robot manipulators for laser cutting | 21 |
| KOROTEYEV A. O., KULIKOV V. P., LUPACHEV A. G., TSYGANKOV I. I. Pulse arc welding technology for thin-sheet casing products made from AL-MG-CU aluminum alloys with reciprocating filler wire feed | 31 |
| LINNIK D. A. Improvement of efficiency of the system for vibration protection of a wheeled tractor driver's workplace | 40 |
| LISKOVICH M. I. Equations for calculating the pressure of compression when producing a coating by using combined drawing..... | 51 |
| LOBIKOVA N. V., GALYUZHIN S. D., LOBIKOVA O. M. Hydraulic calculation of condensate removal system for the ventilation unit | 60 |
| LUSTENKOVA E. S., METELITSA Y. N., MOISEENKO A. N. Modelling of face-bevel roller gearing in NX and MSC.ADAMS | 68 |
| KHOMCHENKO A. V., BOLOTOV S. V., SHULGA A. V. Testing of parameters and analysis of devices for eye protection when welding | 78 |
| SHATUROV D. G., SHELEG V. K. Research into the influence of cutting speed on the tribotechnical characteristics of turning with a cemented carbide tool..... | 88 |

INSTRUMENT MAKING

| | |
|---|----|
| KISELEV M. G., MONICH S. G., PETROV V. A., AHMAD ALI Effect of duration of stopping a disposable syringe plunger rod before liquid extrusion stage on the amount of force required to move it | 97 |
|---|----|

ELECTRICAL ENGINEERING

KOVAL A. S., KONDRATENKO A. G. A MATLAB model of the energy storage device based on a supercapacitor and a two-level buck-boost DC-DC converter 106

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

SAMARTSEV S. B. Reflections on the paradigm of continuing education at University 3.0..... 113

TOKMENINOV K. A. Some directions of prospective development of industrial enterprises in the Republic of Belarus..... 123

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791

С. В. Болотов, В. П. Куликов, А. В. Хомченко

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

UDC 621.791

S. V. Bolotov, V. P. Kulikov, A. V. Khomchenko

ANALYSIS OF WELDING EQUIPMENT LABORATORY TEST RESULTS

Аннотация

Приведена методика и результаты испытаний сварочного оборудования на подтверждение безопасности и соответствия паспортным данным контрольно-измерительной лабораторией Центра сертификации и испытаний.

Ключевые слова:

сварочное оборудование, установка для испытаний, требования безопасности, паспортные данные.

Abstract

The paper presents the method and results of welding equipment testing to confirm its safety and compliance with ratings performed by the Control and Measurement Laboratory of the Certification and Testing Center.

Keywords:

welding equipment, testing equipment, safety requirements, ratings.

Сегодня в мире выпускается большое количество сварочного оборудования, которое имеется почти на каждом предприятии [1].

К сварочному оборудованию предъявляются два основных требования:

– соблюдение технических характеристик, обеспечивающих необходимые параметры технологического процесса сварки [2];

– обеспечение безопасности при эксплуатации.

Эти требования регламентируются стандартами на различные типы сварочных аппаратов. В рамках ЕврАзЭС действует технический регламент ТР ТС 004/2011 *О безопасности низковольтного оборудования*. При этом про-

веряется соответствие стандартам – ГОСТ Р МЭК 60974-1–2012 *Оборудование для дуговой сварки. Часть 1. Источники сварочного тока* [3] (аналогичен международному стандарту EN 60974-1:2012) и ГОСТ 12.3.008–75 *Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Устройства электро-сварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности*.

Кроме этих стандартов, требования к процедуре проверки соответствия реальных технических характеристик сварочных аппаратов паспортным данным изложены в нормативных документах Госпромнадзора, Госатомнадзора, Госстройнадзора.

Контрольно-измерительная лабо-

ратория Центра сертификации и испытаний Белорусско-Российского университета осуществляет испытания сварочного оборудования на соответствие требованиям безопасности и на соответствие паспортным данным. Результаты лабораторных испытаний, проводимых в течение пяти последних лет, позволяют косвенно судить о состоянии парка сварочного оборудования на предприятиях Республики Беларусь.

В структуре испытанного оборудования (рис. 1) преобладают источники питания для ручной дуговой сварки (ММА) – 51 %, что соответствует дан-

ным, приведенным в Концепции развития сварочного производства до 2020 г. (50...60 %) [4]. Доля сварочного оборудования для полуавтоматической MIG/MAG и автоматической SAW сварки составляет 23 и 3 % соответственно. Согласно [4], доля механизированных способов сварки должна составлять 60 %, а автоматизированных 15 %, что позволит повысить производительность труда на 15...20 %, экономить до 45 % электроэнергии, снизить потери электродного металла в 1,5–2,5 раза, улучшить качество сварных швов.

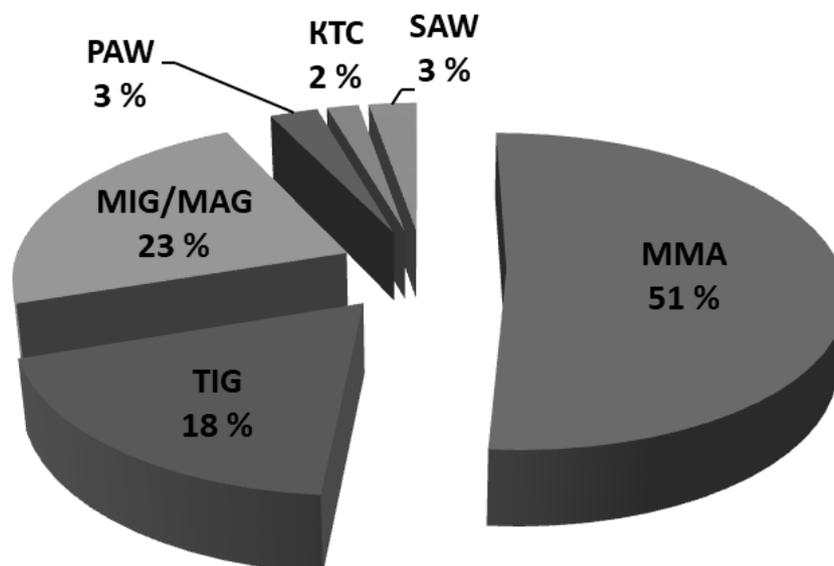


Рис. 1. Структура сварочного оборудования по способам сварки: ММА (Manual Metal Arc) – ручная дуговая сварка штучными (покрытыми) электродами; TIG (Tungsten Inert Gas) – ручная дуговая сварка в среде инертного газа неплавящимся электродом; MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) – дуговая полуавтоматическая сварка в защитной среде инертного/активного газа с помощью плавящегося электрода; PAW (Plasma Arc Welding) – плазменная сварка (сварка сжатой дугой); SAW (Submerged Arc Welding) – автоматическая дуговая сварка металлическим электродом (проволокой) под слоем флюса

Среди испытанного оборудования для дуговой сварки доля источников питания с инверторными преобразователями составляет 72 %, выпрямительного типа – 25 %, трансформаторов – всего 3 %, что свидетельствует о широком использовании современных источников питания, обладающих улучшенными энергетическими и технологическими характеристиками [5].

На рис. 2 представлена структура испытанного оборудования по стра-

нам-производителям. Так, наибольшую долю составляют производители из Китая – 43 %. Оборудование ведущих мировых производителей из Европы и США Fronius (Австрия), КЕМРПИ (Финляндия), ESAB (Швеция), EWM (Германия), Lincoln Electric (США) имеет объем 34 %. Доля оборудования, произведенного в России, составляет 8 %, в других странах – 15 %. Следует отметить, что наибольший объем сварочного оборудования, которое не

соответствует требованиям стандартов по безопасности и паспортным данным, имеет оборудование китайских производителей – 8 %. Все оборудование ведущих европейских производителей, США и России прошло подтверждение на соответствие.

Испытания сварочного оборудования на безопасность проводятся в следующем порядке:

1) внешний осмотр;

- 2) требования к корпусу;
- 3) средства погрузки-разгрузки;
- 4) стойкость к ударам при падении;
- 5) защита, обеспечиваемая корпусом;
- 6) сопротивление изоляции;
- 7) диэлектрическая прочность;
- 8) номинальное напряжение холодного хода;
- 9) допуски на электрические параметры.

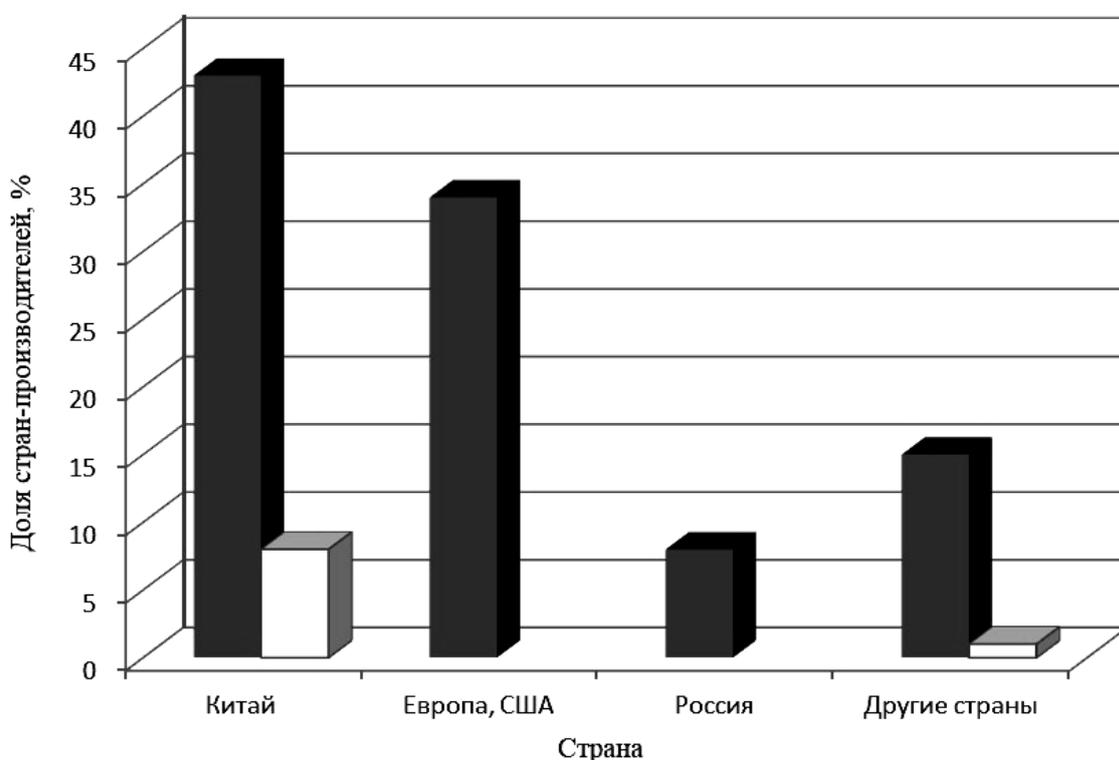


Рис. 2. Структура сварочного оборудования по странам-производителям: ■ – всего; □ – не соответствующего требованиям стандартов

При испытаниях на соответствие паспортным данным пп. 2–4 не выполняются.

Внешний осмотр предполагает обеспечение следующих требований [3]:

- защита от поражения электрическим током в режиме прямого контакта (защита, обеспечиваемая корпусом, конденсаторы, изоляция цепи сварочного тока, ток прикосновения);
- защита от поражения электри-

ческим током в условиях отказа (изоляция между обмотками цепи питания и цепи сварочного тока, внутренние электрические провода и соединения);

- тепловая защита (общие требования, конструкция, расположение, индикация);
- подключение к сети электропитания (напряжение электропитания, электропитание от источников разных напряжений, средства подключения к

цепи электропитания, маркировка зажимов, цепь защиты, анкерное крепление кабеля, входные отверстия, выключатель цепи питания, силовые кабели, сетевое соединительное устройство);

- выход (соединительные элементы сварочной цепи, питание внешних устройств, вспомогательный источник питания);

- табличка с техническими данными;

- регулирование выходной мощности (маркировка регулирующего устройства, индикация регуляторов тока или напряжения).

Самыми распространенными нарушениями, выявляемыми при внешнем осмотре, являются несоответствие номинального тока сетевого соединительного устройства (штепсельной розетки) или сечения сетевого кабеля максимальному эффективному току питания I_{eff} , несоответствие длины сетевого кабеля (не менее 2 м). Отдельные производители комплектуют сварочные источники питания вилкой на 16 А для подключения к бытовой сети 220 В при максимальном эффективном токе питания I_{eff} 20 А и более, что недопустимо.

Проверка требований к корпусу источника питания проводится с использованием специальной установки РЭ-ПП010. Корпус должен выдержать энергию удара 10 Н·м по одной точке в каждой стороне аппарата. Проверка средств, обеспечивающих выполнение погрузочно-разгрузочных работ или переноски (ручек, лямок и т. п.), осуществляется приложением усилия четырехкратного веса источника (не менее 600 Н) в течение 10 с на специальной установке РЭ-ПП9. Стойкость к ударам при падении проверяется трехкратным сбросом источника на твердую и жесткую поверхность (металлическую плиту) с высоты 250^{+10} мм для источника до 25 кг и с высоты 100^{+10} мм для источника массой более 25 кг. Зафиксированы лишь единичные случаи невыполнения требований механической проч-

ности при испытаниях оборудования.

Проверка степени защиты, обеспечиваемой корпусом, выполняется по методике ГОСТ 14254–2015 *Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP)*. Минимальная степень защиты сварочного источника IP 21S, что соответствует защите от проникновения внешних твердых предметов диаметром более 12,5 мм (используется испытательный шарнирный палец) и защите от вредного воздействия проникновения воды при вертикальном каплепадении, выполняемом с помощью специальной установки по проведению испытаний защиты оболочек от воды РЭ-ПП8. Источник испытывается в обесточенном состоянии. После окончания испытания он переносится в безопасную среду и производится испытание сопротивления изоляции и диэлектрической прочности.

Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром ЭСО202/2Г испытательным напряжением постоянного тока 500 В. При этом сопротивление изоляции между цепью питания и сварочным контуром должно составлять не менее 5 МОм, между цепью питания и цепью защиты, а также между сварочным контуром и цепью защиты – не менее 2,5 МОм. Результаты испытаний показали, что сопротивление изоляции сварочных источников питания значительно выше нормы и составляет от 400 до 10000 МОм. Незначительное снижение сопротивления изоляции до 100...200 МОм наблюдалось у отдельного сварочного оборудования, бывшего в эксплуатации и прошедшего проверку на соответствие паспортным данным.

Диэлектрическая прочность изоляции проверяется с помощью пробойной установки УПУ-1М. При этом испытательное синусоидальное напряжение 1100 и 1875 В частотой 50 Гц для номинального питающего напряжения 220 и 380 В прикладывается между цепью питания и корпусом, сварочной цепью и корпусом, а испытательное сину-

соидальное напряжение 2200 и 3750 В частотой 50 Гц для номинального питающего напряжения 220 и 380 В – между цепью питания и цепью сварки. Изоляция должна быть способна выдержать испытательное напряжение в течение 60 с при токе отключения 100 мА. Нарушение диэлектрической прочности изоляции при испытаниях является достаточно редким.

Проверка требований к теплоизо-

ляции, а также испытания тепловой защиты не являются обязательными пунктами стандартных испытаний и выполняются по требованию заказчика по методике, изложенной в [6] с использованием специальной установки РЭ-ППЗ.

Отдельную группу составляют электрические испытания, которые проводятся для подтверждения требований безопасности и паспортных данных на специальной установке (рис. 3).

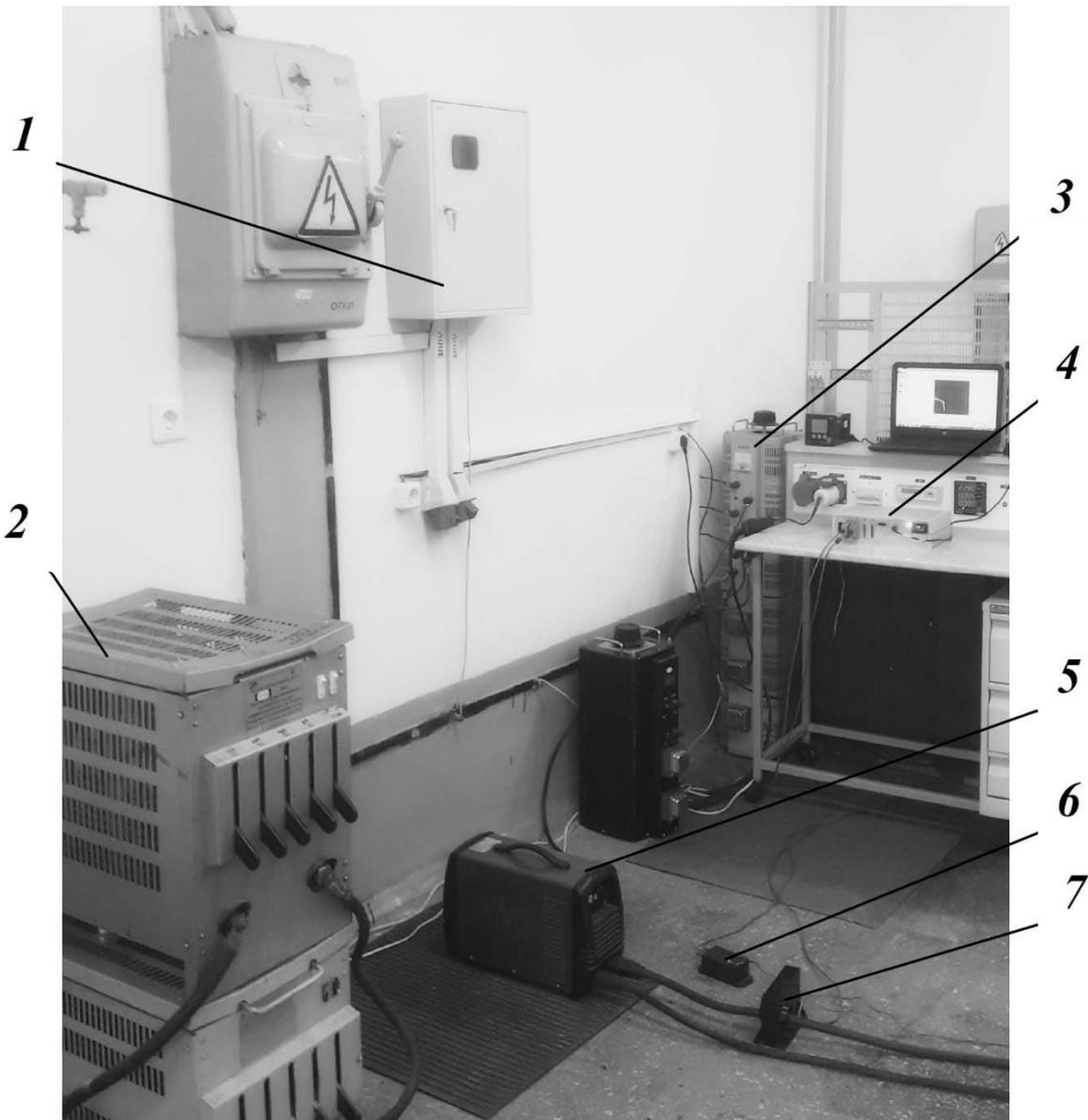


Рис. 3. Установка для электрических испытаний сварочного оборудования: 1 – щиток силовой; 2 – балластные реостаты; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – регистратор параметров сварочных процессов; 5 – испытываемый сварочный источник питания; 6 – датчик напряжения; 7 – датчик тока

Питание установки осуществляется от трехфазной сети переменного тока 380 В, 50 Гц со щитка силового ЩС (поз. 1), в котором установлены аппараты защиты и счетчик электрической энергии СЕ301ВУ S31, подключенный к компьютеру по интерфейсу RS-485 и позволяющий регистрировать действующие значения входного напряжения U_1 , тока питания I_1 , потребляемой мощности P_1 , частоту питающего напряжения f . Для регулирования входного питающего напряжения испытываемых сварочных источников используется лабораторный автотрансформатор TSGC-30k (поз. 3), позволяющий изменять трехфазное линейное напряжение от 0 до 430 В при токе до 40 А. Измерение номинального напряжения без нагрузки U_0 , напряжения нагрузки U_2 и сварочного тока I_2 осуществляется с помощью регистратора РКДП-0401 (поз. 4) с датчиками напряжения LV 100/SP83 (поз. 6) и тока LT 1000-SI (поз. 7), работа которых основана на эффекте Холла. Приведенная погрешность измерений составляет не более 1 %. Регулирование нагрузки испы-

тываемого сварочного источника питания (поз. 5) в диапазоне от 5 до 600 А осуществляется с помощью двух параллельно включенных балластных реостатов РБ-302У2 (поз. 2).

Предельное значение номинального напряжения холостого хода источника питания U_0 по ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012 составляет на постоянном токе 113 В (пиковое значение) и на переменном токе 80 В (пиковое значение). Для источников с механически удерживаемыми горелками допустимое напряжение – 141 В (пиковое значение) и для плазменной резки – 500 В (пиковое значение). Следует отметить, что ГОСТ 12.2.007.8-75 устанавливает предельное значение напряжения холостого хода 100 В среднего значения. Зарегистрировать пиковое значение напряжения U_{0max} возможно по его осциллограмме (рис. 4) или с помощью схемы, представленной на рис. 5 при изменении подстроечного сопротивления R_1 от 0 до 5 кОм. Для приведенной на рис. 4 осциллограммы пиковое значение напряжения $U_{0max} = 94,4$ В, в то время как среднее $U_{0cp} = 89,19$ В.

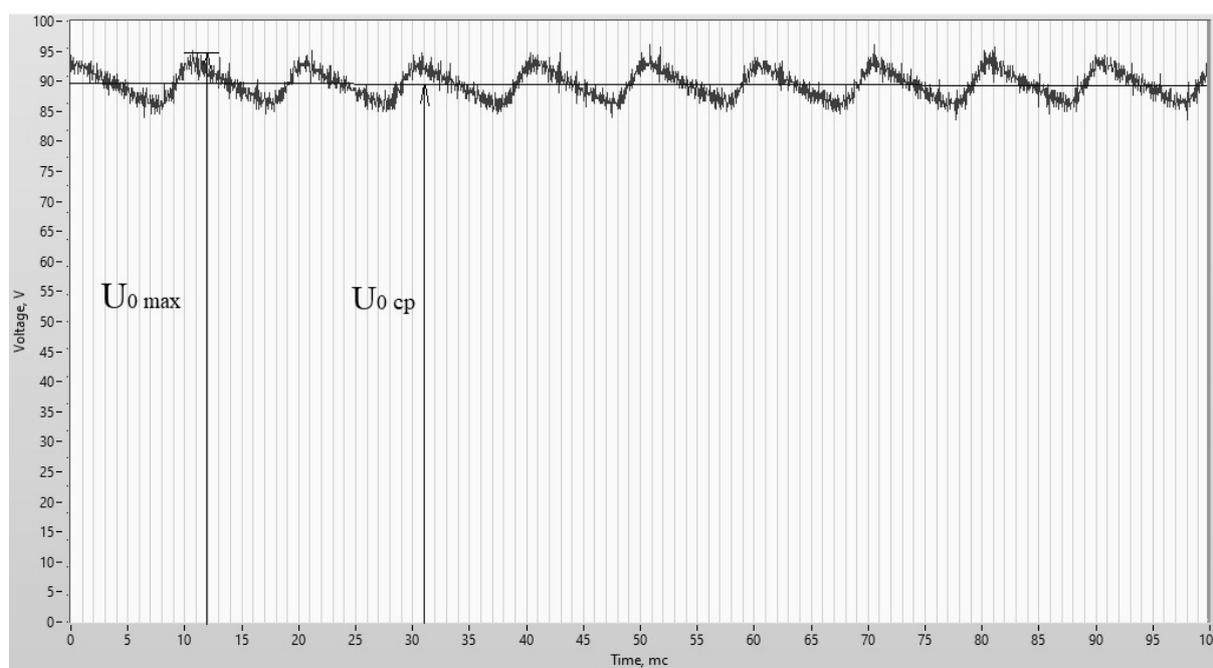


Рис. 4. Осциллограмма напряжения холостого хода источника ОЛИВЕР ММА200 (цена деления 20 В, 5 мс)

На рис. 6 представлена гистограмма частот распределения номинальных напряжений холостого хода испытанных источников питания, работающих на постоянном токе. Напряжение холостого хода в диапазоне 50...60 В имеет

максимальное число сварочного оборудования – 26 %, что достаточно для нормального зажигания дуги. Напряжение выше 113 В (пикового значения) выявлено менее, чем у 1 % испытанных источников.

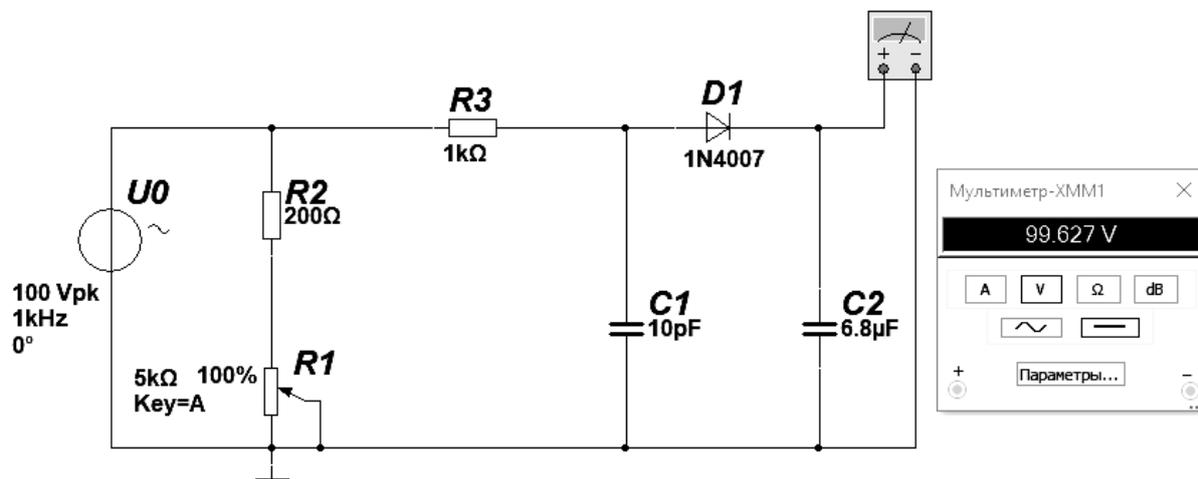


Рис. 5. Схема для выделения пикового значения напряжения

На рис. 7 представлена гистограмма частот распределения номинальных максимальных значений сварочного тока испытанных источников питания. Сварочный ток в диапазоне от 151 до 200 А имеет подавляющее преимущество сварочного оборудования – 43 %, на токах до 150 А работает только 9 %, а на токах свыше 401 А – 5 % источников питания. Следует отметить, что 7 % испытанного сварочного оборудования не прошли подтверждение соответствия по заявленному в паспорте номинальному максимальному сварочному току и максимальной потребляемой мощности, из них – 90 % китайского производства.

Выводы

1. В структуре испытанного сварочного оборудования доля аппаратов для ручной дуговой сварки составляет 51 %, механизированной – 23 %,

автоматической – 3 % при оптимальных значениях 25, 60, 15 % соответственно, что свидетельствует о недостаточном применении на производстве высокопроизводительных способов сварки. Доля сварочного оборудования с инверторными преобразователями составляет 72 %, что свидетельствует о широком использовании современных источников питания, обладающих улучшенными энергетическими и технологическими характеристиками.

2. Наибольшее количество сварочного оборудования поступает из Китая – 43 %. При этом 8 % его общего количества не подтверждает соответствие требованиям безопасности и паспортным данным. Основными нарушениями являются несоответствие номинального тока сетевого соединительного устройства (штепсельной розетки) или сечения сетевого кабеля максимальному эффективному току питания, несоответствие длины сетевого кабеля, несоответствие

допусков на электрические параметры.

3. Напряжение холостого хода большинства испытанного сварочного оборудования лежит в диапазоне 50...60 В, а сварочного тока – в диапазоне от 151 до 200 А. Превышение напряжения хо-

лостного хода выявлено менее, чем у 1 % источников, а несоответствие заявленному номинальному максимальному сварочному току – у 7 % сварочного оборудования.



Рис. 6. Гистограмма частот распределения номинальных напряжений холостого хода

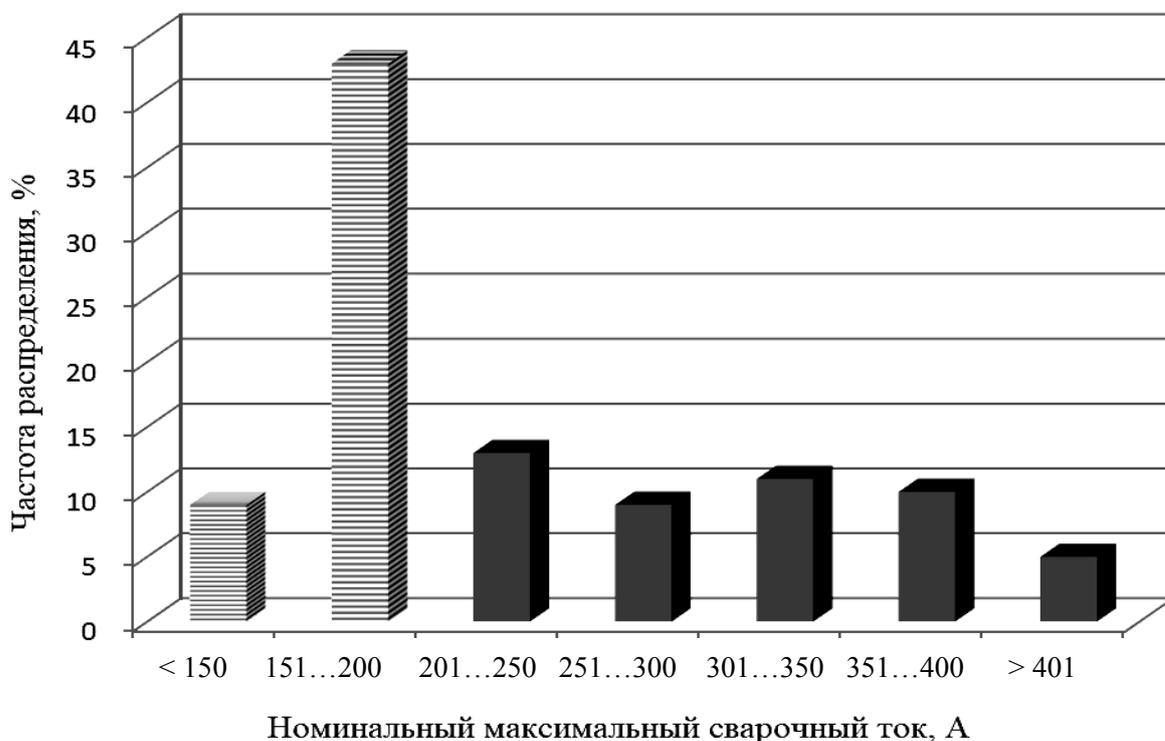


Рис. 7. Гистограмма частот распределения номинальных максимальных значений сварочного тока

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: учебное пособие / Под ред. Г. Г. Чернышова и Д. М. Шашина. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 464 с.
2. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 463 с.
3. **ГОСТ Р МЭК 60974-1–2012.** Оборудование для дуговой сварки. Ч. 1: Источники сварочного тока. – Взамен ГОСТ Р МЭК 60974-1–2004 ; введ. 22.11.12. – Москва: Стандартиформ, 2014. – 85 с.
4. **Денисов, Л. С.** Основы концепции развития сварочного производства Республики Беларусь до 2025 г. / Л. С. Денисов. – Минск : Право и экономика, 2016. – 62 с.
5. **Лупачёв, В. Г.** Источники питания сварочной дуги / В. Г. Лупачёв, С. В. Болотов. – Минск: Вышэйшая школа, 2013. – 207 с.
6. **Болотов, С. В.** Установка для электрических и тепловых испытаний источников питания дуговой сварки / С. В. Болотов, В. А. Игнатов, К. В. Овсянников // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3 (52). – С. 121–127.

Статья сдана в редакцию 03 апреля 2020 года

Сергей Владимирович Болотов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-296-99-31-56. E-mail: s.v.bolotov@mail.ru.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Sergei Vladimirovich Bolotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-296-99-31-56. E-mail: s.v.bolotov@mail.ru.

Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Alexander Vasilyevich Khomchenko, DSc (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

УДК 665.753:662.767.2

А. Н. Карташевич, В. А. Шапоров, Р. С. Даргель

ВЛИЯНИЕ ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

UDC 665.753:662.767.2

A. N. Kartashevich, V. A. Shaporev, R. S. Dargel

INFLUENCE OF GAS-MOTOR FUEL ON THE EFFECTIVE AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF DIESEL ENGINES

Аннотация

Представлены экспериментальные исследования работы тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на дизельном топливе и смесях дизельного топлива с био- и природным газом. Исследовались эффективные и экологические показатели работы дизеля при работе на этих составах по нагрузочной характеристике, снятой на номинальном скоростном режиме 1800 мин⁻¹ при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в. м. т.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил возможность использования биогаза и природного газа в качестве альтернативного топлива для дизельных двигателей. Применение газомоторного топлива на основе био- или природного газа может частично или полностью заменить традиционные нефтяные топлива, сэкономить нефтяные ресурсы, сократить импорт нефтепродуктов без существенного изменения конструкции двигателя.

Ключевые слова:

дизель, дизельное топливо, биогаз, природный газ, метан, отработавшие газы.

Abstract

Experimental studies of the operation of a 4ChN 11.0/12.5 tractor diesel (D-245.5S2) using diesel fuel and mixtures of diesel fuel with bio- and natural gas are presented. The effective and environmental performance of the diesel engine when running on these compositions was studied based on the load characteristic taken at the nominal speed mode of 1800 min⁻¹ with the rational value of fuel injection advance angle equal to $\Theta_{\text{injection advance}} = 22^\circ$ before T. D. C.

The conducted set of experimental studies confirmed the possibility of using biogas and natural gas as an alternative fuel for diesel engines. The use of gas-motor fuel based on bio- or natural gas can partially or completely replace traditional oil fuels, save oil resources, and reduce the import of oil products without changing the engine design significantly.

Keywords:

diesel, diesel fuel, biogas, natural gas, methane, exhaust gases.

Введение

Стремительное развитие транспортных средств в мире потребовало увеличения добычи и использования нефти, что вызвало сокращение ее запасов и, как следствие, рост цен на нефть и нефтепродукты, ухудшение экологии крупных городов от вредных выбросов

автомобилей. С целью решения возникшей проблемы многие страны стали переводить автотранспорт на более дешевый и экологичный вид топлива – природный газ (ПГ) или альтернативные виды топлива, такие как биогаз [1, 2].

Переход на газомоторное топливо позволяет улучшить или оставить на равном уровне тяговые показатели, со-

кратить расход дизельного топлива (ДТ) и снизить выбросы вредных веществ дизеля. Термодинамические и экологические преимущества газомоторного топлива, по сравнению с дизельным, обусловлены энергетическими и физическими показателями газового топлива. По отечественным и зарубежным данным, при эксплуатации дизелей на газомоторном топливе значения выбросов токсичных веществ снижаются по углеводородному составу и окислам азота в 1,5...2,0 раза. При работе на газодизельном процессе происходит значительное снижение дымности, повышение экономичности (на 2...5 %), увеличение ресурса, межремонтного пробега и срока службы моторного масла (на 20...40 %) [3, 4].

Основными характеристиками газового топлива для дизелей являются низшая теплота сгорания, плотность, цетановое число, содержание общей и органической серы, суммарная доля негорючих компонентов, содержание влаги и механических примесей [5].

Переоборудование двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в газодизель целесообразно проводить на базе дизельных двигателей с высокой степенью сжатия. При этом изменение показателей работы газодизеля вызвано различиями в физико-химических свойствах исследуемых топлив [6, 7].

Целью данной работы является оценка влияния замещения ДТ биогазом (БГ) и ПГ на эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2).

Основная часть

Экспериментальные исследования дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) проводились в научно-исследовательской лаборатории «Испытание двигателей внутреннего сгорания» БГСХА на кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства».

В качестве тормозного устройства использовался электротормозной нагрузочный стенд SAK-N670, позволяющий регулировать скоростной и нагрузочный режимы. Массовый расход ДТ определялся электронным расходомером АИР-50 с весовым устройством и комплектом измерительных приборов с выводом данных на монитор компьютера. Подача БГ и ПГ осуществлялась системой питания, конструкция которой защищена охранным документом (патент Республики Беларусь № 12202 [8]). Объемный расход БГ и ПГ определялся газовым счетчиком СМГ-4, а также блоком управляемых форсунок данной системы. Анализ проб отработавших газов (ОГ) производился с помощью автоматического газоанализатора Maha MGT-5. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера СИДА-107 «АТЛАС». Все приборы прошли государственную поверку.

При проведении исследований ДТ замещалось БГ и ПГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой в цилиндры дизеля теплоты, значение которой оставалось постоянным. Количество содержания БГ и ПГ, равное 15 и 30 % соответственно, было выбрано из условия наличия необходимого воздуха для обеспечения полноты процесса сгорания. Исследовались эффективные и экологические показатели работы дизеля на составах смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ, а также 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ по нагрузочной характеристике, снятой на номинальном скоростном режиме 1800 мин^{-1} при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в. м. т. [9]. Содержание метана CH_4 составляло в БГ 61,2 %, а в ПГ – 95,4 %.

На рис. 1 представлена нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$.

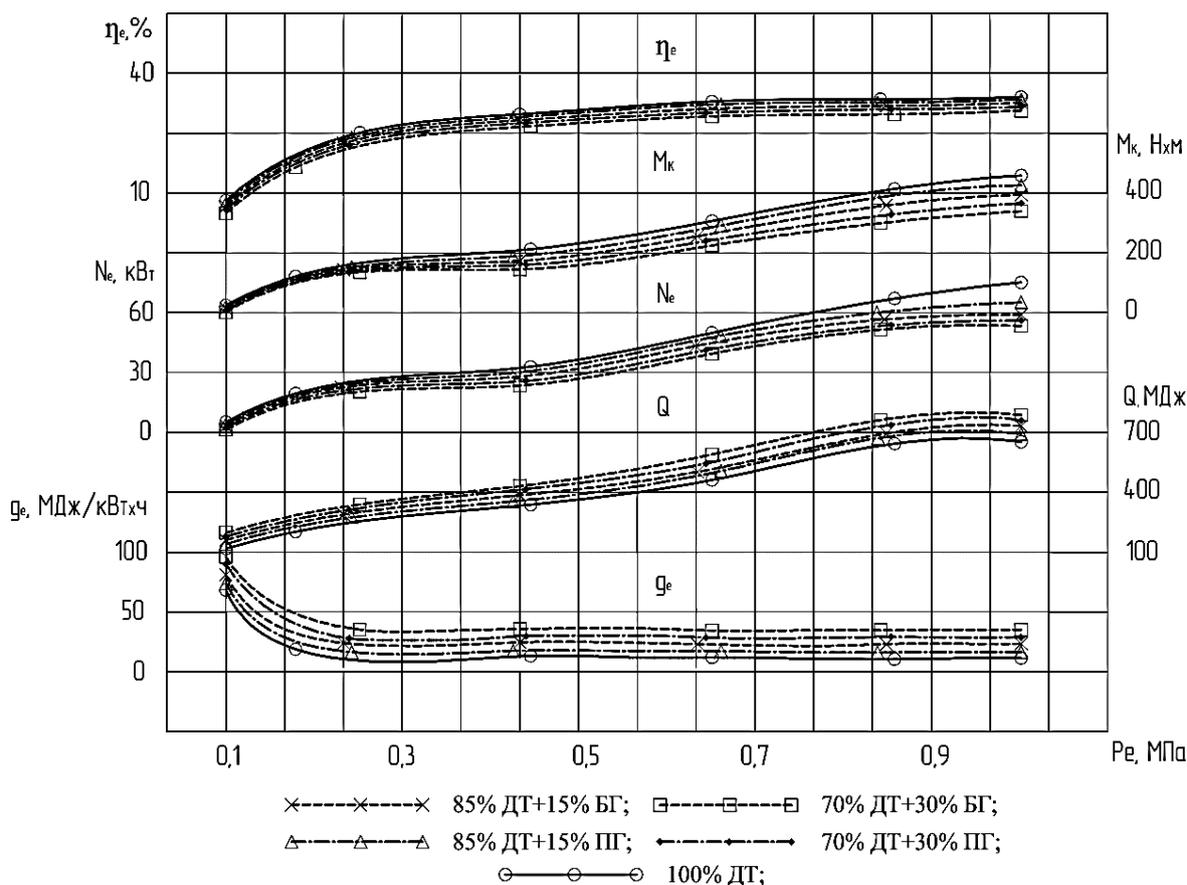


Рис. 1. Нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в. м. т.

При работе дизеля на номинальном режиме (см. рис. 1) на чистом ДТ значение удельного эффективного расхода теплоты g_e значительно ниже, чем на топливах с добавкой БГ и М. Таким образом, при нагрузке $p_e = 0,86 \text{ МПа}$ и работе на чистом ДТ удельный эффективный расход теплоты составляет $g_e = 9,44 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, при нагрузке $p_e = 0,83 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ для смесей с добавками 15 % БГ и 30 % БГ значения $g_e = 16,88 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ и $g_e = 20,15 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, а для смесей с добавками 15 % ПГ и 30 % ПГ при нагрузке $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ значения соответственно $g_e = 13,48 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ и $g_e = 18,04 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Течение сохраняется во всем диапазоне изменения нагрузки. В процентном выражении этот рост составляет 78,81 и 113,45 %

для смесей с БГ, а для смесей с ПГ – 42,80 и 91,10 % по отношению к значению теплоты, вводимой с ДТ. Изменения значения суммарно потребной вводимой теплоты Q_Σ в цилиндры дизеля сопровождаются её определенным ростом во всем диапазоне нагрузки p_e . Значения теплоты Q_Σ в точках нагрузки $p_e = 0,86 \text{ МПа}$, $p_e = 0,83 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ для ДТ и составов смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70% ДТ + 30 % БГ составляют $Q = 686,38 \text{ МДж}$, $Q = 699,22 \text{ МДж}$ и $Q = 706,56 \text{ МДж}$ соответственно. Для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ в точках нагрузки $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ значения теплоты Q_Σ составляют $Q = 692,45 \text{ МДж}$ и $Q = 702,32 \text{ МДж}$. Увеличение количества потребной вводимой теплоты относительно ДТ со-

ставляет на 1,87 и 2,94 % для состава смесей с БГ, а для составов смесей с ПГ – на 1,31 и 2,70 %. Повышение удельного эффективного расхода теплоты и суммарного потребляемого расхода теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, при сохранении мощностных показателей на уровне, установленном заводом-изготовителем, объясняется меньшей, чем у ДТ, теплотой сгорания БГ и ПГ и снижением скорости процесса сгорания смешанного топлива.

Эффективная мощность дизеля имеет рост во всем диапазоне увеличения нагрузки, от $p_e = 0,1$ МПа до $p_e = 0,9$ МПа, далее этот рост незначителен. Для нагрузки $p_e = 0,86$ МПа эффективная мощность дизеля, работающего на ДТ, $N_e = 65$ кВт. При работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ значение мощности $N_e = 59$ кВт и $N_e = 58$ кВт при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,83$ МПа и $p_e = 0,81$ МПа, а при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ оно составляет $N_e = 60$ кВт и $N_e = 58,7$ кВт при нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа. Видно, что мощность значительно уменьшается с ростом замещения ДТ смесями с БГ и ПГ. В сопоставимом выражении это уменьшение составляет 9,23 и 10,77 % для БГ и 8,33 и 10,72 % для ПГ.

Крутящий момент дизеля, аналогично эффективной мощности, растет во всем диапазоне увеличения нагрузки. При нагрузке $p_e = 0,86$ МПа крутящий момент дизеля, работающего на ДТ, составляет $M_k = 406$ Н·м. При работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ его значение $M_k = 363$ Н·м и $M_k = 306$ Н·м при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,83$ МПа и $p_e = 0,81$ МПа. Следовательно, при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ его значение составляет $M_k = 391$ Н·м и $M_k = 338$ Н·м при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа. А именно, крутящий

момент уменьшается с ростом замещения ДТ биогазом на 10,59 и 24,63 %, а замещением ПГ – на 3,84 и 20,12 %.

Величина эффективного КПД при работе дизеля на ДТ с нагрузкой $p_e = 0,86$ МПа составляет 37 %, а при работе на смесях с добавлением БГ значение максимального эффективного КПД $\eta_e = 36$ % и $\eta_e = 35$ % при $p_e = 0,83$ МПа и $p_e = 0,81$ МПа. Так, при работе на смесях с добавлением ПГ данное значение составляет $\eta_e = 36,7$ % и $\eta_e = 35,6$ % при $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа. Следовательно, эффективный КПД дизеля снижается с ростом замещения чистого ДТ на 2,7 и 5,4 % для БГ, а также на 0,81 и 3,78 % для ПГ.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на $n = 1800$ мин⁻¹ представлено на рис. 2.

С увеличением нагрузки (см. рис. 2) содержание сажи С в ОГ при работе как на ДТ, так и на смесях с БГ и ПГ возрастает. Уровень сажи С в ОГ дизеля при достижении нагрузки $p_e = 0,86$ МПа для чистого ДТ составляет 6,7 %, а для смесей, содержащих 15 % БГ и 30 % БГ при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,83$ МПа и $p_e = 0,81$ МПа, – 5,6 и 3,9 %. Для смесей, содержащих 15 % ПГ и 30 % ПГ при нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа, содержание сажи в ОГ составляет 4,4 и 2,7 % соответственно. То есть с ростом присутствия БГ и ПГ в смешанном топливе содержание сажи в ОГ снижается на 16,42 и 41,8 % с применением БГ и на 34,33 и 62,96 % с применением ПГ. Такое снижение объясняется тем, что образование сажи зависит от свойств топлива. Чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц. То есть прочность одной и той же связи зависит от длины молекул. Известно, что молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов БГ и ПР значительно ниже, чем у ДТ, отсюда и следует снижение сажи [10].

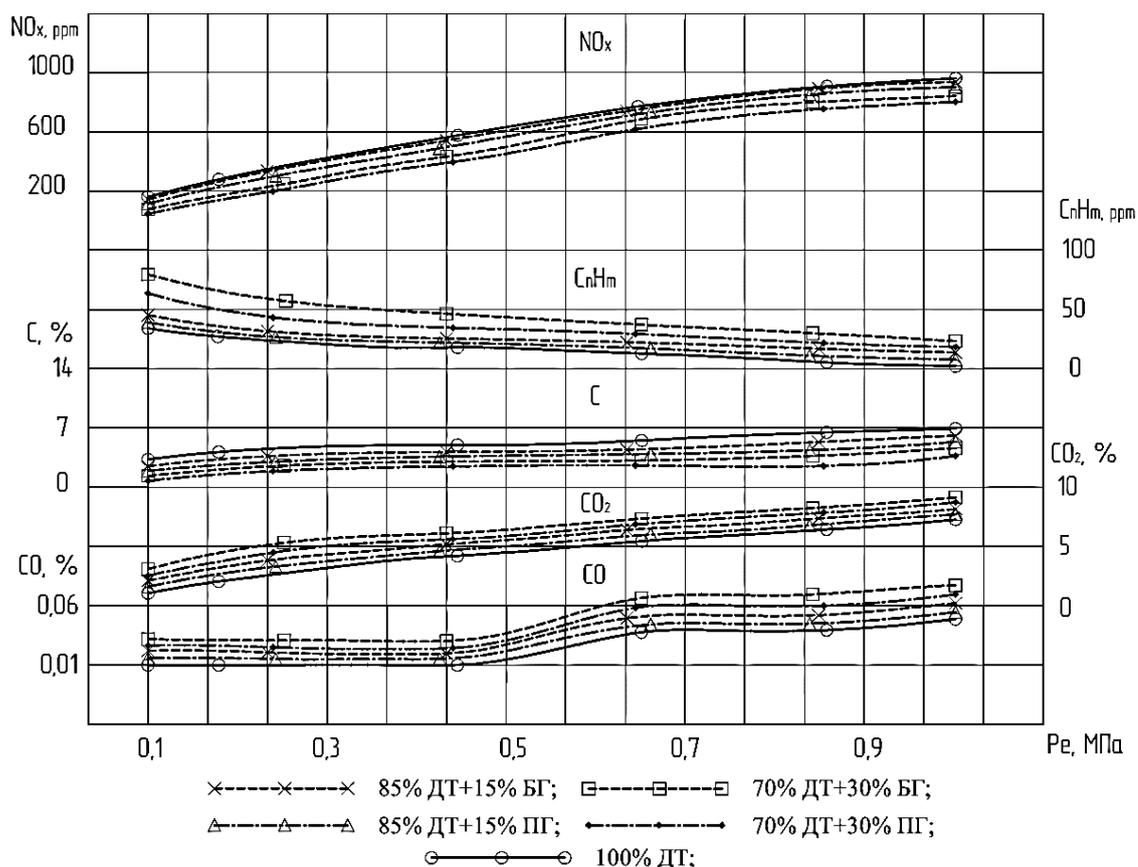


Рис. 2. Экологические показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в. м. т.

Содержание оксидов азота NO_x в ОГ при работе как на ДТ, так и на смесях с БГ и ПГ возрастает при увеличении нагрузки во всем диапазоне, но с увеличением присутствия БГ и ПГ в смесях оксидов азота становится меньше NO_x в сравнении с работой дизеля на чистом ДТ. При $p_e = 0,86 \text{ МПа}$ для чистого ДТ, при $p_e = 0,83 \text{ МПа}$ для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ и при $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ для смеси 70 % ДТ + 30 % БГ содержание оксидов азота NO_x соответственно составляет 898, 891 и 885 ppm. При нагрузке $p_e = 0,81 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ содержание оксидов азота NO_x – 887 и 878 ppm. Содержание оксидов азота NO_x в ОГ на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ меньше, чем на чистом ДТ, на 0,78 и 1,45 %, а на смесях 85 % ДТ +

15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ меньше ДТ на 1,2 и 2,80 %. Текущее обстоятельство объясняется малым избытком свободного кислорода, необходимого для окисления азота, вследствие чего часть поступающего воздуха на впуске замещается БГ или ПГ.

График показателей токсичности и дымности (см. рис. 2) отображает следующее: выбросы оксидов углерода СО с ОГ повышаются по всему диапазону нагрузки и работе на всех составах топлив. При этом добавление БГ и ПГ увеличивает концентрацию СО в ОГ дизеля. В частности, при $p_e = 0,86 \text{ МПа}$ и работе на чистом ДТ выбросы СО составляют 0,04 %, а для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ и сопоставимой нагрузке $p_e = 0,83 \text{ МПа}$ значение выбросов СО равно 0,05 %. Для смеси, состоящей из 70 % ДТ + 30 % БГ, при нагруз-

ке $p_e = 0,81$ МПа выброс СО уже равен 0,067 %. Соответственно, для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ при нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа выбросы СО составляют 0,046 и 0,06 %. Можно констатировать, что содержание СО в ОГ дизеля при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ больше, чем на чистом ДТ, на 25 и 67,5 %, а при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ – на 15 и 50 %. Рост выбросов оксидов углерода поясняется тем, что он происходит вследствие холоднопламенных реакций, при сгорании смесей ДТ+ БГ и ДТ + ПГ с некоторым недостатком кислорода.

Работа дизеля с добавлением 15 % БГ, 30 % БГ, 15 % ПГ и 30 % ПГ сопровождается незначительным повышением выбросов диоксида углерода CO_2 с ОГ по всему диапазону нагрузки. Так, при $p_e = 0,86$ МПа для чистого ДТ, при $p_e = 0,83$ МПа для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а при $p_e = 0,81$ МПа для смеси 70 % ДТ + 30 % БГ содержание диоксида углерода CO_2 составляет 6,49; 7,32 и 7,39 %. Для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ при нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа выбросы CO_2 составляют 7,07 и 7,34 %. Выбросы диоксида углерода CO_2 с ОГ увеличиваются с ростом замещения чистого ДТ в процентном соотношении для БГ на 12,79 и 13,87 %, а для ПГ – на 8,93 и 13,10 %. Данный рост диоксида углерода CO_2 является незначительным. Также важно помнить, что диоксид углерода менее опасен для человека с физиологической точки зрения, чем другие нормируемые компоненты ОГ дизеля. Текущий рост можно объяснить завышенной концентрацией водорода и гидроксидов в продуктах сгорания газомоторных топлив (БГ и ПГ в данном случае), чем у ДТ [11].

Выбросы несгоревших углеводородов C_nH_m в ОГ дизеля снижаются по всему диапазону увеличения нагрузки, но с увеличением присутствия БГ и ПГ

в смеси их становится больше в сравнении с работой дизеля на чистом ДТ. Так, при работе дизеля на чистом ДТ выбросы углеводородов C_nH_m составляют 12 ppm при $p_e = 0,86$ МПа, а на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ – 15 и 23 ppm при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,83$ МПа и $p_e = 0,81$ МПа. Также и на топливах с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ выбросы C_nH_m составляют 13 и 19 ppm при сопоставимой нагрузке $p_e = 0,81$ МПа и $p_e = 0,84$ МПа. В процентном выражении рост выбросов C_nH_m в ОГ применительно к чистому ДТ составляет 25 и 91,66 % на смесях с БГ и 8,33 и 58,30 % на смесях с ПГ. Данное обстоятельство объясняется малым избытком свободного кислорода, необходимого для окисления, вследствие замещения части поступающего на впуске воздуха БГ или ПГ, а также наличием многочисленных плохо горящих компонентов, содержащихся в БГ.

Заключение

Анализ нагрузочной характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5, работающего при $n = 1800$ мин⁻¹ на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ, позволяет сделать следующие выводы:

- эффективные показатели работы дизеля на данных смесях показывают незначительное снижение мощности на 9,23; 10,77; 8,33 и 10,72 %, крутящего момента – на 10,59; 24,63; 3,84 и 20,12 %, КПД – на 2,7; 5,4; 0,81 и 3,78 %, что происходит по всему диапазону роста нагрузки. Также работа дизеля характеризуется увеличением удельного эффективного расхода теплоты смеси на 78,81; 113,45; 42,80 и 91,10 % и суммарно потребного количества теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, на 1,87; 2,94; 1,31 и 2,70 %;

- экологические показатели сопровождаются снижением выбросов с ОГ частиц сажи на 16,42; 41,8; 34,33;

62,96 % и оксидов азота на 0,78; 1,45; 1,2 и 2,80 %, а также незначительным увеличением выбросов с ОГ оксидов углерода на 25; 67,5; 15 и 50 %, диоксида углерода на 12,79; 13,87; 8,93; 13,10 % и углеводов на 25; 91,66; 8,33 и 58,30 %;

– смеси, содержащие ПГ, имеют лучшие показатели относительно смесей, содержащих БГ. Данное обстоятельство объясняется большей долей содержания метана и цетанового числа у ПГ, чем у БГ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2013. – 376 с.
2. **Карташевич, А. Н.** Возобновляемые источники энергии: научно-практическое пособие / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка. – Горки: БГСХА, 2008. – 261 с.
3. **Носырев, Д. Я.** Перспективы и проблемы применения водорода в локомотивных энергетических установках: монография / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, С. А. Петухов. – Самара: Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2014. – 112 с.
4. **Кавтарадзе, Р. З.** Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р. З. Кавтарадзе. – Москва: Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2011. – 238 с.
5. **Анисимов, А. С.** Особенности математического моделирования рабочего процесса двухтопливного двигателя / А. С. Анисимов, И. В. Чернышков // Локомотивы. Газомоторное топливо (Проблемы. Решения. Перспективы): материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Самара: Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 135 с.
6. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учебное пособие / В. А. Марков [и др.]. – Москва: Легион-Автодата, 2008. – 464 с.
7. **Васильев, Ю. Н.** Газовые и газодизельные двигатели / Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский, С. И. Ксенофонтов. – Москва: Газпром, 1992. – 127 с.
8. Система подачи газообразного топлива в дизель: пат. ВУ 12202. – Оpubл. 01.11.2019.
9. **Карташевич, А. Н.** Определение рациональных регулировок дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на смесях дизельного топлива с биогазом / А. Н. Карташевич, В. А. Шаповрев, С. А. Плотников // Вестн. Белорус. гос. сельскохозяйственной акад. – 2019. – № 1. – С. 149–153.
10. **Гуреев, А. А.** Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование / А. А. Гуреев, В. З. Махов, М. М. Ховак // Автотракторные двигатели внутреннего сгорания: тр. МАДИ. – 1975. – Вып. 92. – С. 29–38.
11. **Брозе, Д. Д.** Сгорание в поршневых двигателях / Д. Д. Брозе. – Москва: Машиностроение, 1969. – 247 с.

Статья сдана в редакцию 12 марта 2020 года

Анатолий Николаевич Карташевич, д-р техн. наук, проф., Белорусская сельскохозяйственная академия. Тел.: +375-296-62-19-88.

Виталий Александрович Шаповрев, аспирант, Белорусская сельскохозяйственная академия. Тел.: +375-299-74-97-94.

Руслан Сергеевич Даргель, аспирант, Белорусская сельскохозяйственная академия. Тел.: +375-298-70-65-85.

Anatoly Nikolayevich Kartashevich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian State Agricultural Academy. Phone: +375-296-62-19-88.

Vitaly Aleksandrovich Shaporev, PhD student, Belarusian State Agricultural Academy. Phone: +375-299-74-97-94.

Ruslan Sergeevich Dargel, PhD student, Belarusian State Agricultural Academy. Phone: +375-298-70-65-85.

УДК 621.865

М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин, А. А. Юркина

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ
РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ**

UDC 621.865

M. M. Kozhevnikov, O. A. Chumakov, V. M. Shemenkov, I. E. Ilushin, A. A. Jurkina

**TRAJECTORY OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATORS
FOR LASER CUTTING**

Аннотация

Предложен новый метод решения задачи оптимизации траекторий при роботизированной лазерной резке металлических заготовок. В отличие от известных, предложенный метод основан на представлении пространства поиска в виде направленного графа и позволяет найти множество оптимальных решений по векторному критерию качества.

Ключевые слова:

робот-манипулятор, лазерная резка, оптимизация траекторий.

Abstract

A new method is proposed for solving trajectory optimization problem in the process of robotic laser cutting of metal parts. In contrast to the known techniques, the proposed method is based on the presentation of the search space in the form of a directed graph and makes it possible to find many optimal solutions according to the vector quality criterion.

Keywords:

robot manipulator, laser cutting, trajectory optimization.

Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования производственных процессов лазерной резки металлов является внедрение автоматизированных линий на базе промышленных роботов-манипуляторов. Современные шестисотые манипуляторы имеют широкие возможности по ориентированию режущего инструмента, однако их использование существенно ограничивается отсутствием эффективных методов синтеза траекторий резки, с учетом ограничений, накладываемых спецификой систем управления.

Промышленные системы автономной подготовки управляющих про-

грамм и системы автоматизированного проектирования роботизированных технологических комплексов (РТК) не достаточно полно учитывают технологические характеристики операций лазерной резки, что затрудняет их эффективное использование. При автоматизированном программировании РТК лазерной резки требуется разработка эффективных методов оптимизации траекторий с учетом кинематических характеристик манипулятора, технологических ограничений лазерной резки и системы управления робота. Известные работы [1, 2] рассматривают лишь частные аспекты синтеза траекторий, при роботизированной лазерной резке, ограничиваясь неизбежными кинематическими

системами и задачами коррекции ориентации режущего инструмента при компенсации возникновений скоса кромок. При решении задач оптимизации в известных работах [1–3], как правило, используются скалярные критерии качества траектории лазерной резки.

Система автономной подготовки программ роботов работает на основе информации о движениях технологического инструмента и формирует программу управления РТК, с учётом характеристик манипулятора и технологических ограничений лазерной резки. Среди таких ограничений выделяют допустимую зону нагрева, прямолинейность и ширину реза. Однако наиболее трудоемкой задачей является синтез рациональных движений манипулятора, как с обеспечением сглаживания траекторий режущего инструмента, так и со

снижением объема движений по каждому сочленению робота [3, 4].

Основная часть

В общем случае исходными данными для поиска траектории режущего инструмента являются две вектор-функции:

$$\{p(t), n(t) : |n(t)| = 1; t \in [0; T]\}, \quad (1)$$

где t – время; $p(t)$ – вектор координат рабочей точки режущего инструмента, $p(t) \in R^3$; $n(t)$ – единичный вектор нормали к поверхности заготовки, $n(t) \in R^3$ (рис. 1).

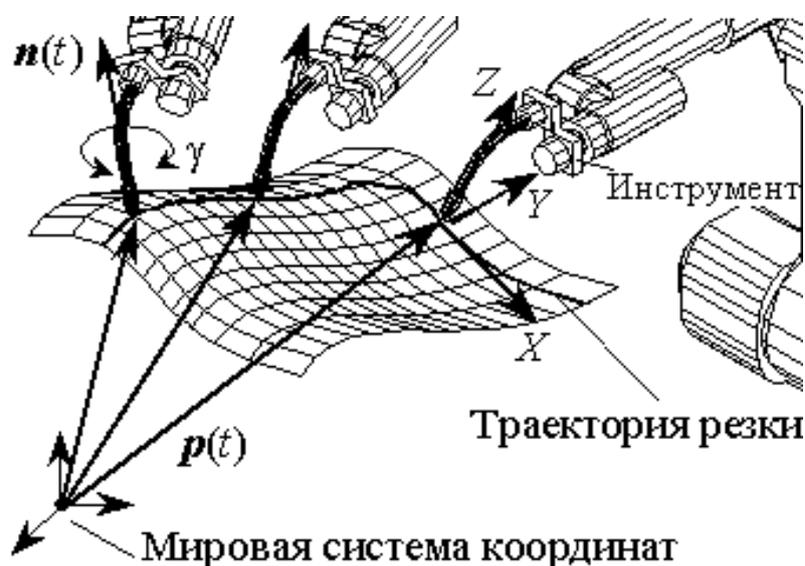


Рис. 1. Ориентация режущего инструмента относительно контура резки

Введем следующий единичный вектор

$$a(t) = \dot{p}(t) / |\dot{p}(t)|, \quad (2)$$

где $\dot{p}(t)$ – вектор скорости рабочей

точки режущего инструмента. $\dot{p}(t) = dp/dt$.

Зададим, что векторы $a(t)$ и $n(t)$ ортогональны, т. е. $p(t)^T \cdot a(t) = 0$, для каждой точки траектории режущего ин-

инструмента сформируем системы координат по следующему принципу. Направим ось X по направлению движения, ось Z – вдоль оси вращения режущего инструмента, ось Y направим таким образом, чтобы в совокупности с осями X и Z сформировать правостороннюю декартову систему координат (см. рис. 1). Тогда для определения пространственного положения и ориентации рабочей точки режущего инструмента может быть использована следующая матрица преобразования:

$$H(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{n}(t) & \mathbf{a}(t) \times \mathbf{n}(t) & \mathbf{a}(t) & \mathbf{p}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где символом « \times » обозначено векторное произведение.

$$\mathbf{R}_n(\gamma) = \begin{bmatrix} n_x^2 V_\gamma + C_\gamma & n_x n_y V_\gamma - n_z S_\gamma & n_x n_z V_\gamma + n_y S_\gamma \\ n_x n_y V_\gamma + n_z S_\gamma & n_y^2 V_\gamma + C_\gamma & n_y n_z V_\gamma - n_x S_\gamma \\ n_x n_z V_\gamma - n_y S_\gamma & n_y n_z V_\gamma + n_x S_\gamma & n_z^2 V_\gamma + C_\gamma \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $C_\gamma = \cos(\gamma)$; $S_\gamma = \sin(\gamma)$;
 $V_\gamma = 1 - \cos(\gamma)$.

Отметим, что параметр γ в формуле (4) является избыточной степенью свободы и может быть эффективно использован для оптимизации траектории, а также учета кинематических ограничений робота-манипулятора и обхода его столкновений с препятствиями. Эти ограничения можно описать с помощью бинарных функций $\Psi_k(\mathbf{L})$ и $\Psi_c(\mathbf{L})$, которые принимают ненулевые значения в запретных областях. Помимо этого, определим бинарную функцию $\Psi_s(\mathbf{L})$, ненулевое значение которой определяет достижение роботом-манипулятором нижней грани его мобильности [3, 4].

Помимо обхода ограничений избыточная степень свободы γ в (4), (5) используется для получения оптимизированных сглаженных траекторий по углам в сочленениях робота-манипу-

Технология лазерной резки допускает вращение режущего инструмента на произвольный угол вокруг оси луча лазера, причем такое вращение не влияет на качество процесса. С учетом этого определим положение и ориентацию рабочей точки режущего инструмента в функции угла его вращения $\gamma \in (-\pi; \pi]$:

$$\mathbf{L}(t, \gamma) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\gamma) & | & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{H}(t),$$

$$t \in [0, T], \quad \gamma \in (-\pi, \pi], \quad (4)$$

где $\mathbf{R}(\gamma)$ – матрица вращения на угол γ вокруг оси, определяемой вектором $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$,

лятора. С учетом специфики известных методик решения обратной задачи кинематики для промышленных роботоманипуляторов с шестью степенями свободы [4–6] при заданном индексе конфигурации функции $\gamma(t)$ соответствует шесть траекторий изменения углов в сочленениях $q_k(t)$, $k = 1, \dots, 6$:

$$\gamma(t) \rightarrow \{q_1(t), \dots, q_6(t)\}. \quad (6)$$

Оптимизация траектории позволяет устранить резкие повороты режущего инструмента путем минимизации следующих критериев качества при фиксированном индексе конфигурации робота:

1) максимальный размах углов в сочленениях робота-манипулятора

$$J_\Delta^{(k)}[\mathbf{q}(t)] = \max_t [q_k(t)] - \min_t [q_k(t)]; \quad (7)$$

2) максимальное смещение углов

в сочленениях робота-манипулятора от центра r_i диапазона изменения

$$J_d^{(k)}[\mathbf{q}(t)] = \max_t |q_k(t) - r_k|; \quad (8)$$

3) объем движений робота-манипулятора по углам в сочленениях

$$J_s^{(k)}[\mathbf{q}(t)] = \int_0^T |\dot{q}_k(t)| dt; \quad (9)$$

4) максимальная угловая скорость вращения сочленений робота-манипулятора

$$J_v^{(k)}[\mathbf{q}(t)] = \max_t [\dot{q}_k(t)]. \quad (10)$$

Отметим, что критерии (7)–(10) вычисляются для каждого сочленения манипулятора, соответственно с учетом (6) можно определить следующий векторный критерий качества траектории:

$$J(\mathbf{q}) = [J(q_1), \dots, J(q_6)]^T. \quad (11)$$

Полученная таким образом задача является задачей многокритериальной оптимизации. Наиболее часто при решении таких задач применяется метод Парето-оптимальности, который формирует множество «не улучшаемых» решений. Среди этих решений невозможно выбрать решение, лучшее по всем показателям. В связи с этим целесообразно оставить окончательный выбор решения за пользователем.

Учитывая сложный характер ограничений, пространство поиска решения дискретизируется посредством равномерной сетки. Это позволяет сформировать направленный граф, каждой вершине которого соответствует матрица локаций режущего инструмента L , а также вектор, задающий углы в сочленениях \mathbf{Q} манипулятора. Ребра графа соединяются только с теми вершинами, которые представляют соседние точки

траектории режущего инструмента. Эта траектория задается полилинией, на которой равномерно размещаются n узлов:

$$\{p_i, a_i\}, i = 0, \dots, n, \quad (12)$$

где

$$\|p_i - p_{i-1}\| = \Delta s; \quad \forall i = 1 : n; \quad (13)$$

Δs – шаг дискретизации.

Аналогично (12), (13) дискретизируем интервал изменения угла вращения режущего инструмента $\gamma \in (-\pi, \pi]$ путем деления его на m частей

$$\gamma \in \{-\pi : 2\pi/m : \pi\}. \quad (14)$$

Каждая локация режущего инструмента $L[t, \gamma(t)]$ далее тестируется на соответствие кинематическим ограничениям, столкновение с препятствиями и близость к нижней грани мобильности робота. В результате, из локаций, удовлетворяющих ограничениям и соответствующих им углов в сочленениях, формируем следующее множество:

$$\{p_i, n_i\} \rightarrow \left\{ \frac{L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{im}}{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{im}} \right\}. \quad (15)$$

Это множество позволяет представить пространство поиска в виде многослойного направленного графа с вершинами $V = \{L_{ij}\}$ и ребрами:

$$E = \{(L_{ij}, L_{kl}) | i = k - 1; \forall i, j, k, l\}. \quad (16)$$

Такой граф показан на рис. 2, причем каждой дискретной точке на контуре резки соответствуют вершины графа. Они обозначены эллипсами, причем заштрихованные эллипсы соответствуют локациям, в которых нарушаются кинематические ограничения, имеют место столкновения с препятствиями, либо робот близок к нижней грани мобильности.

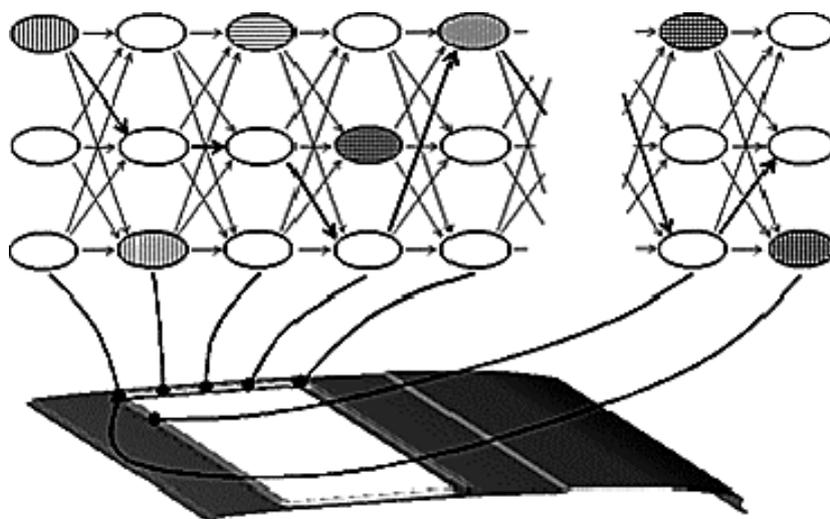


Рис. 2. Описание пространства поиска посредством направленного графа

С учетом (15), (16) синтез траектории робота сводится к следующей задаче оптимизации на графе.

На направленном графе с множеством вершин V и множеством ребер E найти путь длиной n :

$$\Pi(\gamma_0, \dots, \gamma_n) = \langle L_{0j_1} \rightarrow L_{1j_2} \rightarrow \dots \rightarrow L_{nj_n} \rangle, \quad (17)$$

у которого начальная вершина $V_0 \in \{L_{0j}\}$ и конечная вершина $V_n \in \{L_{nj}\}$ и на котором минимизируется заданный критерий качества.

Данная задача сводится к поиску «оптимальной» последовательности

$$\Gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_m), \gamma_i \in \Gamma_i. \quad (18)$$

Все элементы этой последовательности принадлежат множеству Γ_i , которое получается за счет тестирования L_{ij} на соответствие ограничениям. Для промышленных РТК лазерной резки, как правило, $n > 1000$, а Γ_i состоит из 50 и более элементов, поэтому поиск решения путем полного перебора невозможен и соответственно для решения задачи поиска необходима разра-

ботка эффективных вычислительных процедур.

Углы в сочленениях робота, соответствующие локации L_{ij} , обозначим $q_k(i, j)$, а соответствующие траектории робота обозначим $q_k(i, j_{\gamma_i})$. С учетом этих обозначений, представления пространства поиска в виде направленного графа, а также постановки задачи оптимизации (17), (18) критерии качества (7)–(10) могут быть переформулированы в следующей дискретной форме:

1) максимальный размах углов в сочленениях робота-манипулятора

$$J_{\Delta}^{(k)}(\Gamma) = \max_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] - \min_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] \rightarrow \min; \quad (19)$$

2) максимальное смещение углов в сочленениях робота-манипулятора от центра r_i диапазона изменения

$$J_d^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - r_k| \rightarrow \min; \quad (20)$$

3) объем движений робота-манипулятора по углам в сочленениях

$$J_s^{(k)} = \sum_i |q_k(i, j_{\gamma i}) - q_k(i-1, j_{\gamma i-1})| \rightarrow \min_{\Gamma}; \quad (21)$$

4) максимальная угловая скорость вращения сочленений робота-манипулятора

$$J_v^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma i}) - q_k(i-1, j_{\gamma i-1})| \rightarrow \min_{\Gamma}. \quad (22)$$

Для тестирования предложенного метода оптимизации рассмотрена модель трехзвенного плоского манипулятора, показанного на рис. 3. Этот манипулятор имеет три вращательных сочленения и три звена с длинами $l_1 = 1$ м, $l_2 = 1$ м и $l_3 = 0,25$ м. Контур резки пред-

ставляет собой квадрат с размером стороны $d = 0,8$ м. Углы контура резки скруглены с радиусом $r = 0,1$ м. Центр контура размещен в точке с координатами (1, 1). Между контуром и препятствием имеется зазор $\Delta d = 0,05$ м.

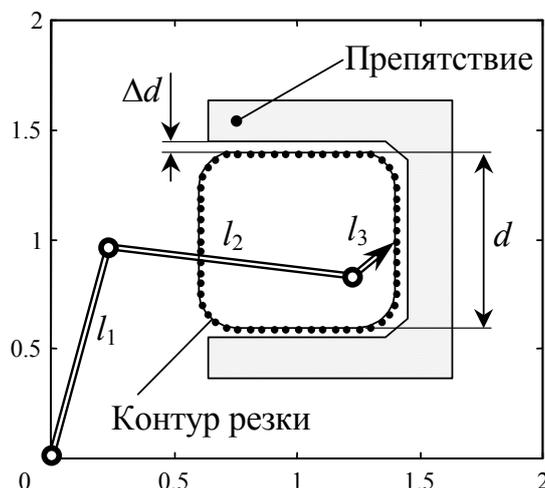


Рис. 3. Обход контура резки плоским трехзвенным манипулятором

Решая обратную задачу кинематики манипулятора известным методом [4] и изменяя ориентацию последнего звена с шагом 10° , получена последовательность из 1385 позиций $\{L_{ij}\}$ и последовательность углов в сочленениях $\{Q_{ij}\}$. Для исследования значимости предложенных критериев качества первоначально выполнен поиск оптимальных решений для отдельных критериев, вычисленных для углов q_1 , q_2 и q_3 . В частности использовались критерии качества (19), (21), (22). Пример полученных оптимальных решений для

угла q_3 показан на рис. 4, а. Пример траекторий по углам q_1 , q_2 , q_3 при минимизации критерия $J_s^{(3)}$ показан на рис. 4, б. Из графиков видно, что решения отличаются преимущественно на начальном и конечном участках траектории, а средние части траекторий практически совпадают. Полученные числовые значения критериев качества для угла q_3 приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что при минимальном значении критерия J_s значения других критериев также достаточно малы, что позволяет опреде-

литель данный критерий в качестве главного при реализации сглаженной траектории. Данные, полученные по сов-

местной оптимизации траекторий всех сочленений, приведены в табл. 2.

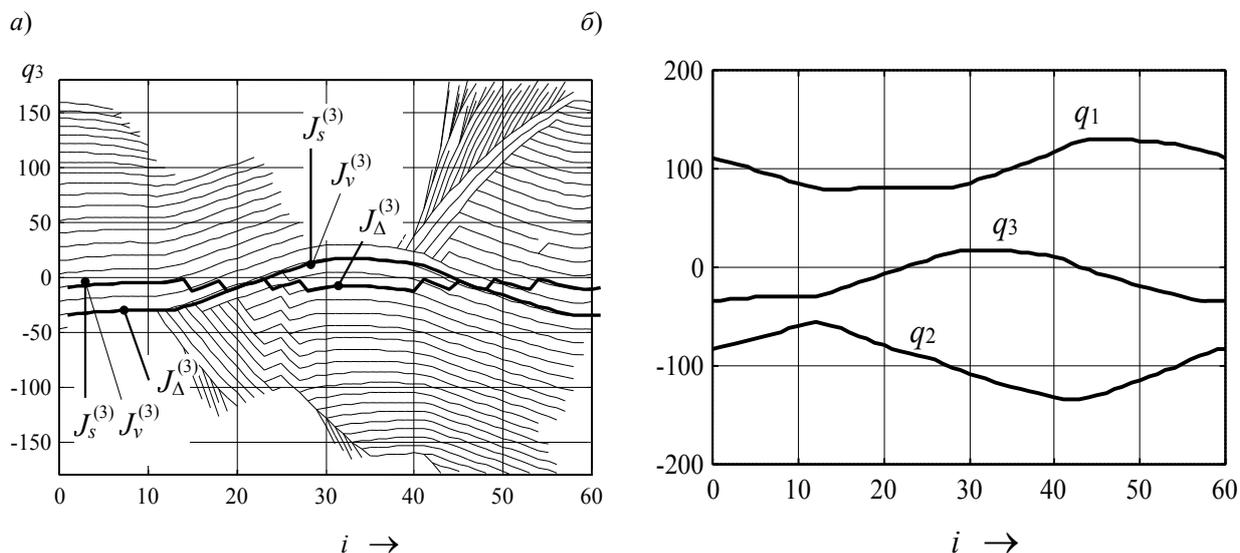


Рис. 4. Оптимальные решения по углу q_3 и траектории при минимизации критерия $J_s^{(3)}$

Табл. 1. Результаты оптимизации для звена q_3

| Критерий | В градусах | | |
|--|--------------------|-------------|-------------|
| | $J_{\Delta}^{(3)}$ | $J_v^{(3)}$ | $J_s^{(3)}$ |
| Минимум диапазона изменения координат $J_{\Delta}^{(3)}$ | 11,50 | 10,69 | 161,8 |
| Минимум приращений координат $J_v^{(3)}$ | 52,26 | 3,84 | 105,0 |
| Минимум объема движения $J_s^{(3)}$ | 52,26 | 3,84 | 105,0 |

Табл. 2. Результаты оптимизации траекторий всех сочленений робота

| Критерий | $J_s^{(1)}$ (27,7) | $J_s^{(2)}$ (62,92) | $J_s^{(3)}$ (105,0) | $J_v^{(1)}$ (1,47) | $J_v^{(2)}$ (2,54) | $J_v^{(3)}$ (3,84) | $J_{\Delta}^{(1)}$ (19,09) | $J_{\Delta}^{(2)}$ (41,32) | $J_{\Delta}^{(3)}$ (11,50) |
|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $\sum_k w_k J_s^{(k)}$ | 106,6 | 153,6 | 105,7 | 3,96 | 3,70 | 4,00 | 51,31 | 76,80 | 52,72 |
| $\max_k J_v^{(k)}$ | 107,1 | 157,2 | 105,0 | 3,82 | 3,86 | 3,84 | 52,06 | 78,58 | 52,26 |
| $J_s^{(1)}$ | 27,7 | 222,6 | 3080,3 | 2,76 | 19,43 | 355,31 | 19,09 | 66,09 | 357,26 |
| $J_s^{(2)}$ | 281,5 | 62,9 | 1901,8 | 24,31 | 3,57 | 202,50 | 62,49 | 49,76 | 335,59 |
| $J_s^{(3)}$ | 107,1 | 157,2 | 105,0 | 3,82 | 3,86 | 3,84 | 52,06 | 78,58 | 52,26 |

Из таблицы видно, что, оптимизация по критерию взвешенной суммы $\sum_k w_k J_s^{(k)}$ обеспечивает практически те же результаты, что и минимизация критерия $J_s^{(3)}$. Однако, в общем случае целесообразно сформированную последовательность решений представить разработчику РТК для принятия окончательного решения.

В рассмотренном примере с трехзвенным манипулятором наилучшие результаты получены для оптимизации критерия качества (11), где в качестве J выступает объем движений по углам в

сочленениях. При этом диапазон изменения углов и приращения углов имеют приемлемые для практики значения.

Следующий пример (рис. 5) демонстрирует использование шестисотого промышленного робота-манипулятора Fanuc 710iC/50 в процессе лазерной резки сглаженного кругового контура. Для исследования значимости предложенных критериев качества первоначально выполнен поиск оптимальных решений по отдельным критериям, вычисленным для углов кисти манипулятора q_4 , q_5 и q_6 .

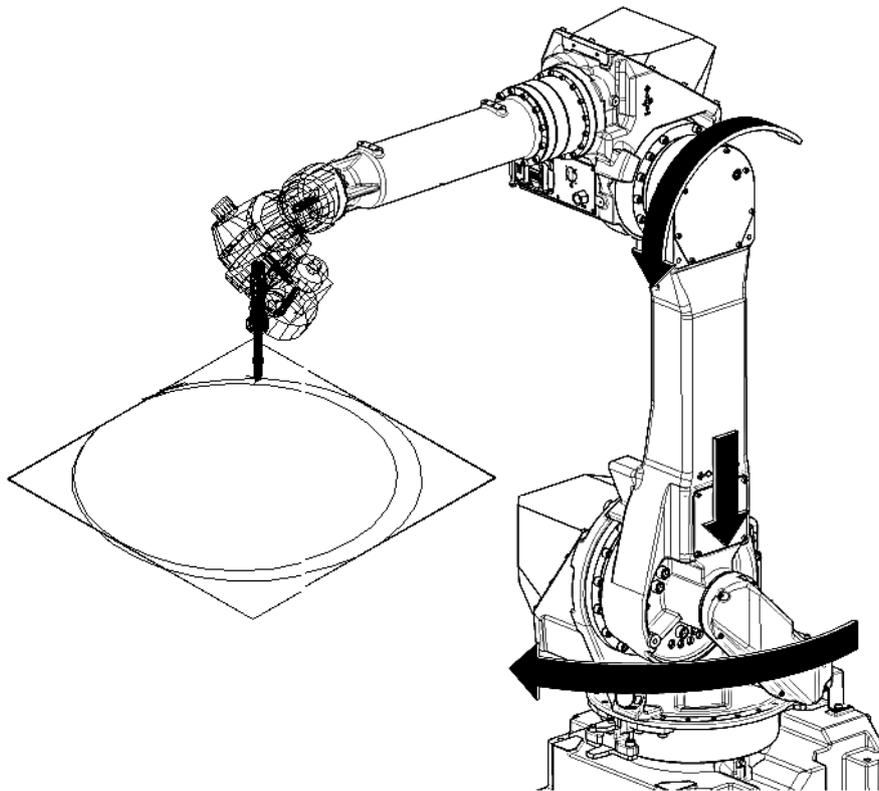


Рис. 5. Промышленный робот-манипулятор Fanuc 710iC/50 в процессе лазерной резки кругового контура

Решение обратной задачи кинематики выполнялось при фиксированных значениях индикаторов конфигурации. Для оптимизации траектории использовались критерии качества (19), (21), (22). Примеры полученных оптимальных решений для углов кисти q_4 , q_5 и q_6

показаны на рис. 6, при вращении режущего инструмента в диапазоне изменения угла ориентации $\gamma \in (-\pi; \pi]$. Эксперименты показывают, что при минимальном значении критерия качества J_s значения других критериев также до-

статочны малы, что позволяет определить данный критерий главным при реализации сглаженной траектории ре-

жущего инструмента при его движении по круговому контуру.

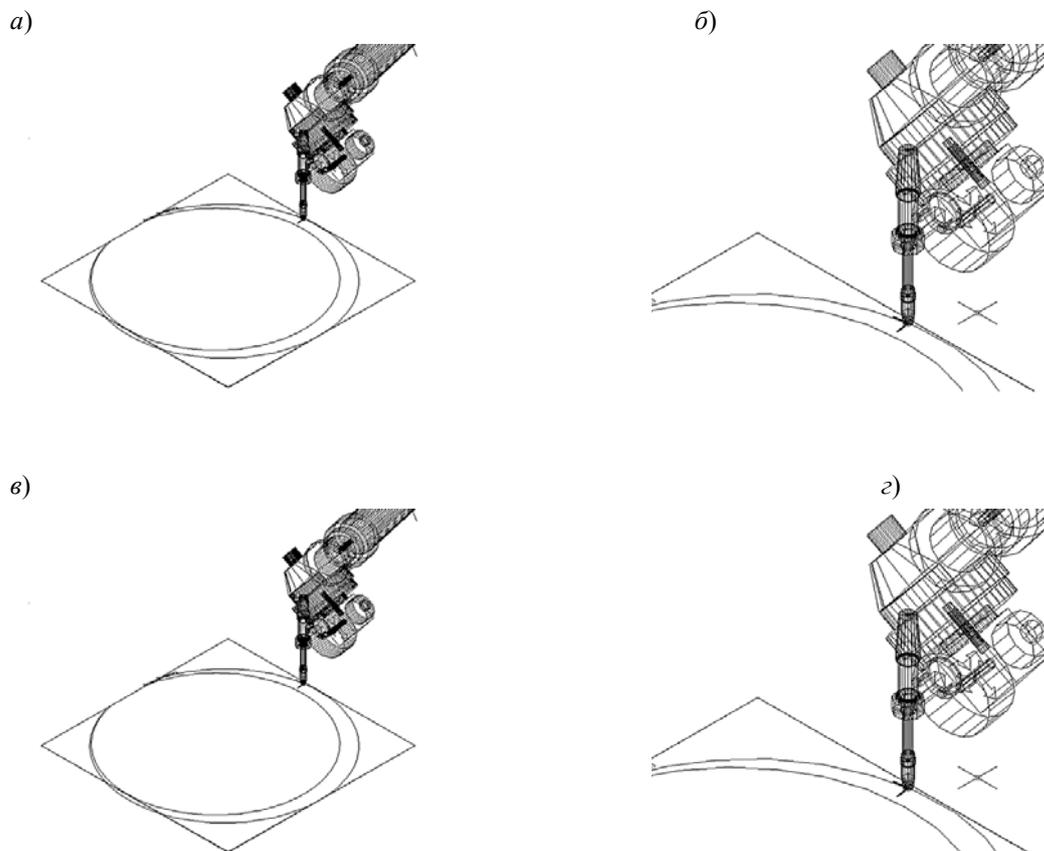


Рис. 6. Оптимальные решения для углов кисти q_4 , q_5 и q_6 робота-манипулятора Fanuc 710iC/50

Выводы

В данной работе выполнена формализация технических требований по качеству траекторий роботизированной лазерной резки и сформулирован векторный критерий оптимальности, учитывающий максимальный размах и смещение углов в сочленениях, объем движений робота и максимальную угловую скорость вращения сочленений. Разработан метод решения задачи оптимизации, основанный, в отличие от известных, на представлении пространства поиска в виде направленного графа и позволяющий найти множество опти-

мальных решений по векторному критерию для искомой траектории лазерной резки. Данный метод позволяет эффективно синтезировать гладкие траектории лазерной резки с учетом ограничений, накладываемых системами управления роботами-манипуляторами.

Выполнено исследование эффективности предложенного метода и показана его эффективность при синтезе траектории лазерной резки. Установлено, наиболее значимыми элементами векторного критерия качества являются элементы, представляющие объем движения по углам в сочленениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moharana, B.** Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot / B. Moharana, R. Gupta, B. K. Kushawaha // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 176–179.
2. **Geiger, M.** Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development / M. Geiger, A. Kach // Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. – Montréal: Presses Internationales Polytechnique, 2000. – P. 69.
3. **Dolgui, A.** Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting / A. Dolgui, A. Pashkevich // International Journal of Production Research. – Taylor and Francis. – London, 2009. – Vol. 47, № 20. – P. 5691–5715.
4. **Dolgui, A.** Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems / A. Dolgui, A. Pashkevich // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6–11, 2008. – P. 14822–14827.
5. Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов-манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 4–13.
6. **Чумаков, О. А.** Оптимизация перемещений инструмента робота / О. А. Чумаков, С. В. Снисаренко // Информационные технологии и управление: материалы 54 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апр. 2018 г. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 20–21.

Статья сдана в редакцию 24 марта 2020 года

Михаил Михайлович Кожевников, канд. техн. наук, Могилевский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-222-64-96-76.

Олег Анатольевич Чумаков, канд. техн. наук, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: +375-172-93-86-73.

Владимир Михайлович Шеменков, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-23-02-53.

Игорь Эдуардович Илюшин, Могилевский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-222-64-96-76.

Анна Александровна Юркина, Могилевский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-222-64-96-76.

Mikhail Mikhailovich Kozhevnikov, PhD (Engineering), Mogilev State University of Food Technologies. Тел.: +375-222-64-96-76.

Oleg Anatolievich Chumakov, PhD (Engineering), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Тел.: +375-172-93-86-73.

Vladimir Mikhailovich Shemenkov, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Тел.: +375-222-23-02-53.

Igor Eduardovich Hushin, Mogilev State University of Food Technologies. Тел.: +375-222-64-96-76.

Anna Aleksandrovna Jurkina, Mogilev State University of Food Technologies. Тел.: +375-222-64-96-76.

УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, В. П. Куликов, А. Г. Лупачев, И. И. Цыганков

ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Al-Mg-Cu С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

UDC 621.791.763.2

A. O. Koroteyev, V. P. Kulikov, A. G. Lupachev, I. I. Tsygankov

PULSE ARC WELDING TECHNOLOGY FOR THIN-SHEET CASING PRODUCTS MADE FROM AL-MG-CU ALUMINUM ALLOYS WITH RECIPROCATING FILLER WIRE FEED

Аннотация

Исследованы особенности и эффективность применения для сварки трудно свариваемых алюминиевых сплавов Al-Mg-Cu технологий дуговой сварки с возвратно-поступательной подачей присадочной проволоки. Проведены механические испытания с целью оценки свойств соединений и возможностей использования рассматриваемой технологии для ремонта оболочковых корпусных изделий из листового алюминия толщиной 3 мм.

Ключевые слова:

перенос электродного металла, импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов, управление источником питания для сварки, механические испытания сварных соединений.

Abstract

The features and efficiency of the application of arc welding technologies with reciprocating filler wire feed have been studied for welding hard-to-weld Al-Mg-Cu aluminum alloys. Mechanical tests have been carried out in order to assess the properties of welded joints and the possibilities of using the technology in question for repair of casing products made from 3mm thick sheet aluminum.

Keywords:

electrode metal transfer, pulse arc welding of aluminum alloys, welding power source control, mechanical tests of welded joints.

Алюминиевые сплавы, благодаря комплексу уникальных свойств, в последнее время получают все большее распространение для изготовления конструкций.

Высокие показатели коррозионной стойкости, удельной прочности и предела текучести, хорошая тепло- и электропроводность, широкие возможности для обработки материалов и элементов конструкций резанием и фрезерованием делают такие материалы трудно заменимыми во многих отраслях, начиная ав-

томобиле- и судостроением и заканчивая пищевой промышленностью [1–3].

Наибольшее распространение при изготовлении корпусных изделий получили термоупрочняемые сплавы системы легирования Al-Mg-Cu. Хорошие показатели прочности делают их применение наиболее эффективным в элементах конструкций, воспринимающих воздействие динамических и статических, а также знакопеременных нагрузок.

Вместе с тем такие материалыобладают худшей из всех распространен-

ных сплавов алюминия свариваемостью и в целом не рекомендуются для использования в качестве элементов сварных конструкций. Это обусловлено необратимыми процессами, происходящими в зоне термического влияния в основном металле рядом с линией сплавления, приводящими к разупрочнению отдельных участков, оплавлению границ зерен и последующему резкому снижению прочности соединения. Отдельные участки этих зон после охлаждения охрупчиваются, что приводит к возникновению локальных разрушений в виде трещин. Степень разупрочнения в этом случае связана с величиной тепловложения в основной металл, в связи с чем способы сварки с минимизацией размеров зоны термического влияния являются предпочтительными, однако в традиционном виде не позволяют обеспечить требуемый уровень равнопрочности соединения, что является одной из основных проблем [2, 3].

В последнее время часто возникает необходимость выполнения ремонтных работ корпусных изделий, изготовленных из сплавов Al-Mg-Cu, что вызывает острую необходимость решения ряда актуальных вопросов, связанных с разработкой технологии их сварки, обладающей необходимой степенью автоматизации, высокой производительностью и максимально возможными показателями качества и эксплуатационных свойств сварного соединения.

Традиционно, как и для подавляющего большинства конструкционных металлических материалов, сварка является основным способом создания неразъемных соединений из широкого круга алюминиевых сплавов. Наиболее распространенным из дуговых способов на сегодняшний день является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. Этот способ, благодаря инертности защитной газовой среды, считается наиболее универсальным для большинства конструкционных материалов и сплавов цветных металлов и

позволяет получить сварное соединение высокого качества с минимальными потерями легирующих элементов, что обусловлено отсутствием окислительных газов в защитной атмосфере. Сварка может выполняться как с присадочным металлом, так и без него, но в подавляющем большинстве случаев – в ручном варианте. С одной стороны, это позволяет обеспечить высокое качество сварного соединения, т. к. скорость сварки невелика и за счет инертности атмосферы в зоне горения дуги отсутствуют не только нежелательные газовые примеси в виде окислительных активных газов из атмосферы и продуктов диссоциации паров воды с выделением свободного водорода, но и продукты металлургических процессов в виде окислов и неметаллических включений, являющихся распространенной причиной возникновения многих дефектов. С другой стороны, низкая скорость сварки приводит к существенному повышению трудоемкости выполнения сварного соединения, что делает этот способ непроектируемым и ограничивает его применение в промышленных масштабах. Кроме того, способ характеризуется достаточно большой зоной термического влияния, что, как было указано ранее, выступает нежелательным фактором при сварке рассматриваемых материалов.

Перспективным направлением развития технологических процессов применительно к рассматриваемым сплавам, чувствительным к термическому циклу сварки, является максимальное снижение тепловложения в основной металл.

На сегодняшний день большинство технологий сварки разработано для диапазона параметров режима, соответствующего переносу электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка. Современные подходы к процессам цифрового управления источниками питания, а также разработки в области дуговой сварки с управляемым переносом металла позво-

ляют осуществлять в реальном времени контроль за быстропротекающими процессами каплеобразования, контролировать и регулировать величину сварочного тока в момент короткого замыкания с целью минимизации разбрызгивания металла и снижения тепловложения. При этом для перехода жидкой капли расплавленного металла в сварочную ванну используется реверсивное движение присадочной проволоки в противоположном направлении с частотами около 70...80 Гц, что обеспечивает эффективное отделение капли даже в отсутствие горения дуги при коротком замыкании. Такая технология нашла применение в системе Fronius CMT и используется при сварке тонкостенных изделий. Вместе с тем практического применения технология на предприятиях Республики Беларусь не находит.

В статье приведены результаты исследований по разработке технологии автоматической сварки плавящимся электродом с реверсивной подачей при-

садочной проволоки элементов обечайки корпусных изделий, к которым предъявляются повышенные требования по обеспечению гарантированной защиты внутренней части от попадания брызг расплавленного металла и ограничению максимальной температуры нагрева внутренних поверхностей.

Химический состав свариваемого изделия представлен в табл. 1. Анализ проводился на оптико-эмиссионном спектрометре Solaris GNR SCP по результатам шести измерений.

Установлено, что сплав относится к системе легирования Al-Mg-Cu с незначительными добавками Si и Mn.

Для определения механических свойств материала корпуса изделия были проведены испытания на статическое растяжение на разрывной машине РГМ1000М. Установлено, что временное сопротивление разрыву образцов составляет ориентировочно 440...500 МПа (табл. 2).

Табл. 1. Химический состав корпуса исследуемого изделия

| Номер измерения | Al | Cu | Mg | Mn | Si |
|-----------------|-------|------|------|------|------|
| 1 | 93,57 | 3,90 | 1,87 | 0,31 | 0,08 |
| 2 | 93,16 | 3,94 | 2,10 | 0,31 | 0,18 |
| 3 | 93,22 | 3,99 | 1,96 | 0,33 | 0,16 |
| 4 | 93,11 | 3,92 | 2,45 | 0,36 | 0,04 |
| 5 | 93,11 | 3,79 | 2,66 | 0,32 | 0,32 |
| 6 | 93,29 | 3,93 | 1,98 | 0,34 | 0,13 |
| Среднее | 93,24 | 3,91 | 2,17 | 0,32 | 0,15 |

Табл. 2. Результаты механических испытаний на статическое растяжение элементов основного металла корпуса изделия

| Образец | Размер образца, мм | | | Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву |
|---------|--------------------|---------|-----------------------------|---|
| | Ширина | Толщина | Площадь поперечного сечения | |
| О-1 | 10,8 | 2,2 | 23,76 | 11930 Н / 502,1 МПа |
| О-2 | 9,8 | 2,2 | 21,56 | 9560 Н / 443,4 МПа |
| О-3 | 11,2 | 2,2 | 24,64 | 11760 Н / 477,3 МПа |

Для проведения экспериментальных исследований по разработке технологии сварки корпуса была разработана экспериментальная установка, включающая в себя сварочный робототехнологический комплекс FANUC, интегрированный с оборудованием Fronius CMT Trans Puls Synergic (TPS) 3200.

Для сварки элементов рассматриваемого изделия использовались проволоки типа Св-АМг5 по ГОСТ 7871-75 (ER 5356 по AWS A5.10) и типа Св-АК5 по ГОСТ 7871-75 (ER 4043 по AWS A5.10). Химический состав проволок представлен в табл. 3. Выбор системы легирования проволок Al-Mg и Al-Si основан на положении о том, что

при сварке материалов повышенной прочности, склонных к возникновению трещин в металле шва и околошовной зоны, необходимо обеспечить максимальную пластичность наплавленного металла шва при соблюдении требуемого уровня прочности. При этом установлено, что для выполнения прихваток, особенно в случае, если они выполняются неплавящимся электродом в аргоне на предварительных операциях сборки изделий под автоматическую сварку, предпочтительным является использование проволок и присадочных прутков, легированных кремнием, что позволяет минимизировать вероятность возникновения трещин в кратере шва.

Табл. 3. Химический состав используемых проволок

| Марка проволоки | Содержание элемента, % | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | Cu | Si | Mn | Fe | Zn | Be | Mg | Ti | Cr |
| Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75) | 0,05 max | 0,4 max | 0,5...0,8 | 0,40 max | 0,2 max | 0,002...0,005 | 4,8...5,8 | 0,1...0,2 | – |
| ER 5356 (AWS A5.10) | 0,10 max | 0,25 max | 0,05...0,20 | 0,40 max | 0,10 max | 0,0003 max | 4,5...5,5 | 0,06...0,20 | 0,05...0,20 |
| Св-АК5 (ГОСТ 7871-75) | 0,2 max | 4,5...6,0 | – | 0,6 max | 0,1 max | – | – | 0,1...0,2 | – |
| ER 4043 (AWS A5.10) | 0,30 max | 4,5...6,0 | 0,05 max | 0,80 max | 0,10 max | 0,0003 max | 0,05 max | 0,20 max | – |

Исследуемый образец представлял собой корпус цилиндрической формы с кольцевым швом. Толщина корпуса – 3 мм. С технологической точки зрения и условий ремонта наиболее предпочтительным является сварка горизонтального шва (ось изделия располагается вертикально). Выбор пространственного положения сварки обусловлен отсутствием необходимости учета смены положения сварочной горелки относительно изделия и горизонта, что неизбежно потребовало бы корректировки значений параметров режима. В случае горизонтального шва перемещение горелки не связано с изменением пространственного положения сварного соединения, что существенно упрощает систему управле-

ния параметрами режима.

Одним из важнейших вышеописанных условий выполнения соединения являлось предотвращение попадания брызг расплавленного металла во внутреннюю полость корпуса. В связи с этим были рассмотрены два варианта технологии сварки: вариант с использованием подкладного кольца (остающаяся подкладка) из алюминиевых сплавов различной системы легирования и вариант технологии сварки без зазора.

Использование подкладного кольца при сварке алюминиевых сплавов является технологически эффективным способом обеспечения гарантированного проплавления кромок свариваемых деталей за счет несколько более высо-

ких значений силы сварочного тока и напряжения на дуге. Вместе с тем такая технология характеризуется повышенной трудоемкостью сборки изделия, необходимостью прихватки кольца к свариваемым кромок и большой вероятностью возникновения несплавлений в корневой части шва сварного соединения. Это обусловлено спецификой разрушения окисной пленки на поверхности алюминиевых сплавов и ориентацией оси сварочной дуги относительно стыка. В случае горения дуги между одной из кромок и присадочной проволокой разрушение пленки на поверхности подкладного кольца затруднено, происходит лишь эффект смачивания жидким алюминием этой поверхности без образования химических связей и объемного взаимодействия [4].

Наиболее эффективным способом является сварка встык без зазора. Возникающие при этом трудности, связанные с невозможностью контроля глубины проплавления, компенсируются цифровым управлением источником питания, позволяющим отслеживать по изменению длины дуги моменты превышения проплавления и компенсировать это снижением скорости подачи присадочной сварочной проволоки [4].

Сварка осуществлялась в автоматическом режиме с использованием системы СМТ в двух вариантах технологии – в стандартном и импульсном режимах.

Перед экспериментальными работами по сварке корпуса выполнялась его резка. Важный вопрос в этом случае – выбор места реза. Существует два подхода к этой проблеме: резка по основному металлу корпуса и по ранее выполненному шву заводского соединения (если оно имеется и работы производятся в ремонтных целях). На взгляд авторов, наиболее предпочтительной является резка по шву заводского соединения, если таковое имеется. Это позволя-

ет использовать эффект наплавленных кромок при сварке. При этом присадочный металл, отличающийся по химическому составу от основного материала на линии сплавления, контактирует с так называемым переходным слоем, что позволяет несколько снизить вероятность возникновения трещин и повысить эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Свариваемые кромки подготавливались механическим способом при помощи зачистных шлифовальных машинок и металлических щеток для уменьшения толщины окисной пленки, а также для снижения количества загрязнений в ней. Перед сваркой выполнялись обезжиривание кромок при помощи растворителя, протирка и сушка.

Внешний вид сварного соединения, полученного по разрабатываемой технологии, а также образцов для проведения испытаний на статическое растяжение и статический изгиб представлен на рис. 1–3.

Целью механических испытаний была оценка прочностных и пластических свойств сварного соединения. Испытания на статическое растяжение проводились в соответствии с СТБ ЕН 895–2002. Для проведения испытаний использовалась разрывная машина РГМ 1000 М1 с компьютерной системой регистрации параметров и построением диаграммы растяжения.

Результаты испытаний сварных соединений, полученных с применением предлагаемой разрабатываемой технологии и заводских соединений, представлены в табл. 4–6 и на рис. 4.

Механические испытания на статический изгиб проводились в соответствии с СТБ ЕН 910–2002. Образцы изгибались в направлении лицевой поверхности наплавленного металла шва (тип образца – FBB). Результаты испытаний представлены в табл. 6.

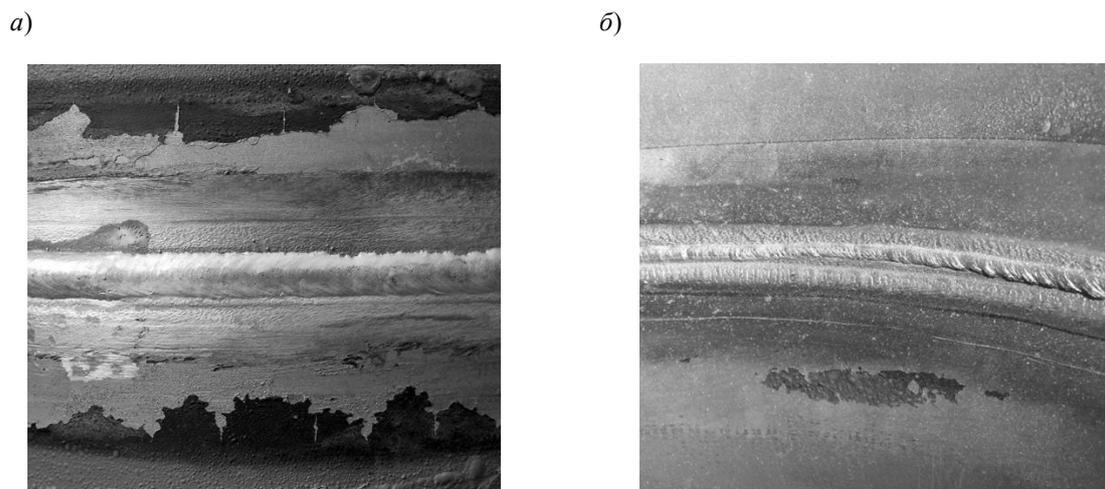


Рис. 1. Внешний вид сварного соединения: *а* – наружная поверхность шва; *б* – внутренняя поверхность шва (по краям обратного валика наблюдаются валики заводского сварного соединения)

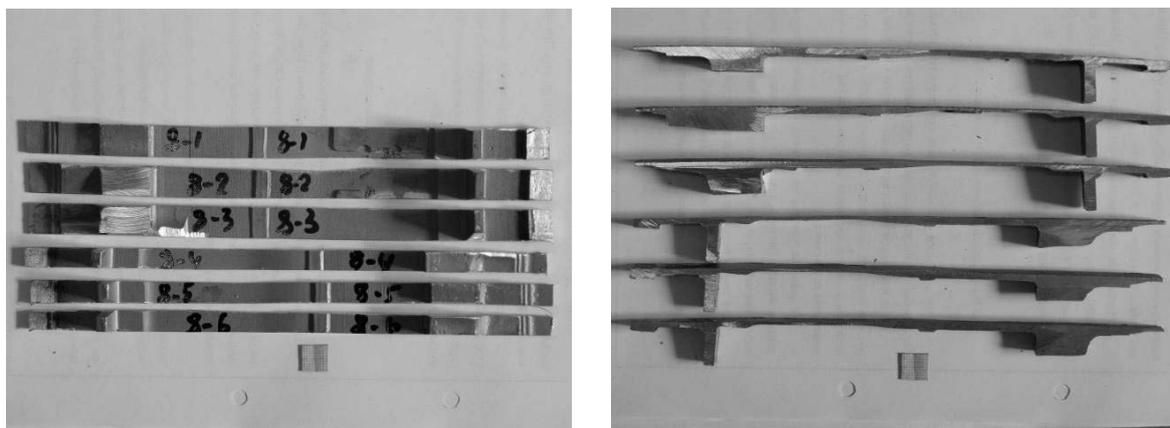


Рис. 2. Внешний вид образцов для проведения механических испытаний с заводским сварным соединением

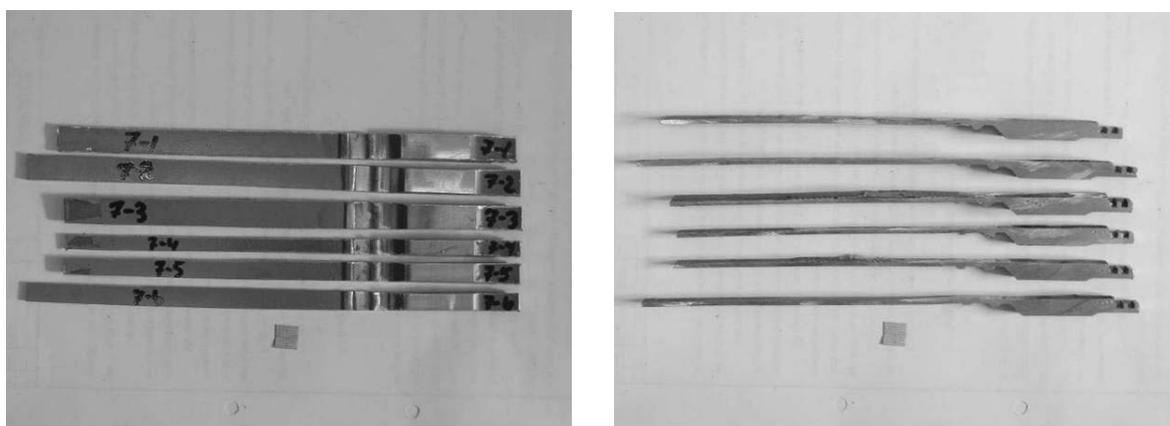


Рис. 3. Внешний вид образцов для проведения механических испытаний со сварным соединением, полученным с использованием предлагаемой технологии ремонта

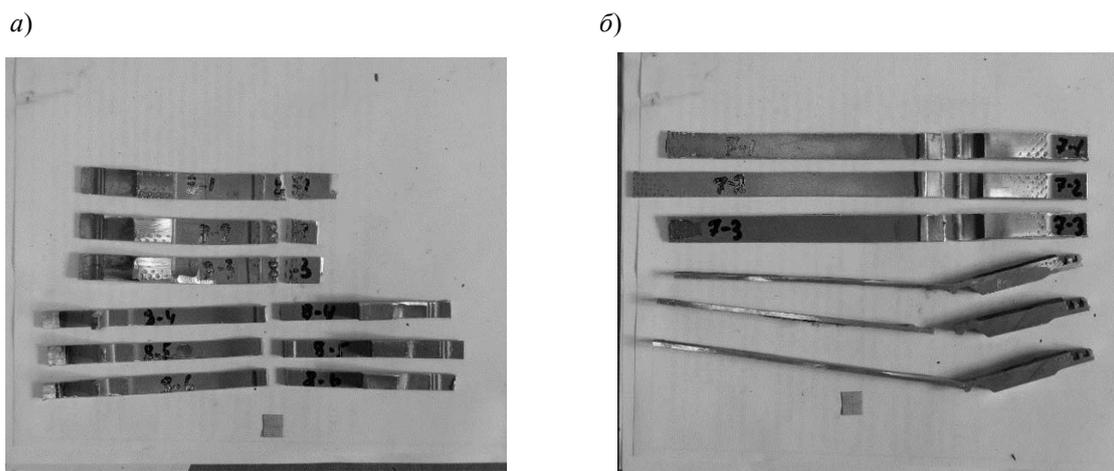


Рис. 4. Внешний вид образцов после проведения механических испытаний на статическое растяжение и статический изгиб: *а* – испытания заводского сварного соединения; *б* – испытания соединения, полученного по предлагаемой технологии

Табл. 4. Результаты механических испытаний на статическое растяжение образцов, сваренных по предлагаемой технологии

| Образец | Размер образца, мм | | | Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву Место разрыва образца |
|---------|--------------------|---------|-----------------------------|--|
| | Ширина | Толщина | Площадь поперечного сечения | |
| 7-1 | 11,5 | 2,0 | 23,0 | 9670 Н / 420,4 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |
| 7-2 | 11,5 | 2,0 | 23,0 | 8750 Н / 380,4 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |
| 7-3 | 12,1 | 2,0 | 24,2 | 8780 Н / 362,2 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |

Табл. 5. Результаты механических испытаний на статическое растяжение заводского сварного соединения

| Образец | Размер образца, мм | | | Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву Место разрыва образца |
|---------|--------------------|---------|-----------------------------|--|
| | Ширина | Толщина | Площадь поперечного сечения | |
| 8-1 | 12,0 | 2,51 | 30,1 | 14230 Н / 472,4 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |
| 8-2 | 11,0 | 2,5 | 27,5 | 12260 Н / 445,8 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |
| 8-3 | 11,9 | 2,5 | 29,7 | 13700 Н / 460,5 МПа (Н/мм ²) ЗТВ |

Табл. 6. Результаты механических испытаний на статический изгиб

| Образец (тип) | Размер образцов для испытаний | | | |
|---------------|-------------------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| | Ширина образца, мм | Толщина образца, мм | Угол загиба, град | Тип испытания |
| 7-4 | 7,3 | 2,0 | 15 | FBB |
| 7-5 | 8,8 | 2,0 | 15 | FBB |
| 7-6 | 8,6 | 2,0 | 15 | FBB |
| 8-4 | 7,6 | 2,5 | 10 | FBB |
| 8-5 | 7,7 | 2,5 | 10 | FBB |
| 8-6 | 7,8 | 2,5 | 10 | FBB |

Выводы

По результатам проведения механических испытаний образцов, вырезанных из корпуса изделия, на статическое растяжение и статический изгиб установлено следующее.

Угол загиба образцов, содержащих элементы сварного шва, выполненного по заводской технологии сварки (образцы 8-4, 8-5, 8-6), составил 10 град (см. табл. 6). При этом разрушение происходит по зоне сплавления шва с основным металлом без видимого развития трещины,

скачкообразно и носит хрупкий характер, что свидетельствует о его чрезвычайно низкой пластичности.

При испытании на статический изгиб образцов, содержащих элементы шва, полученного по разрабатываемой технологии, угол загиба составил 15 град. При этом внутренняя поверхность шва (обратная сторона валика шва) не удалялась с целью имитации реальных условий выполнения сварного соединения (рис. 5). Разрушение происходит с момента возникновения трещины и её распространения по сечению образца.

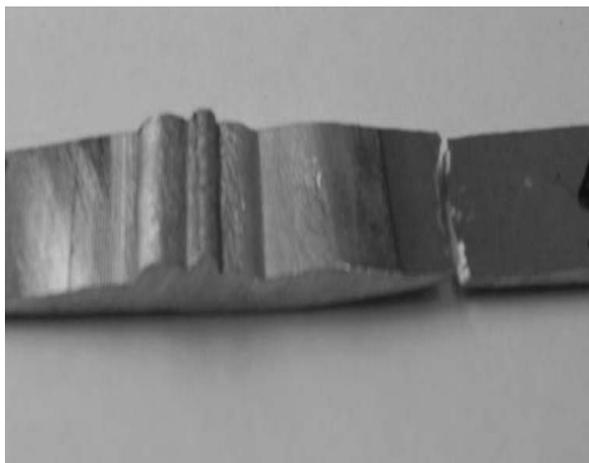


Рис. 5. Образец после испытаний на статическое растяжение

Наиболее вероятной причиной такого характера разрушения является концентрация напряжений по линии

сплавления со стороны незачищенного обратного валика шва.

При испытании на статическое

растяжение элемента изделия, содержащего сварной шов без удаления выпуклости с обратной стороны валика, выполненный по разрабатываемой технологии, установлено, что разрушение происходит по основному металлу в удалении от зоны сварки, что свидетельствует о достаточной прочности полученного соединения применительно к реальным условиям эксплуатации (см. рис. 5).

Временное сопротивление разры-

ву образцов, содержащих элементы сварного шва, выполненного по разрабатываемой технологии, при испытаниях на статическое растяжение составило 360...420 МПа. Разрушение происходит по линии сплавления.

На основании проведенных исследований разработана технология сварки, обеспечивающая отсутствие перегрева тонкостенных обечаек и исключая попадание брызг расплавленного металла внутрь изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 463 с.: ил.
2. **Никифоров, Г. Д.** Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов / Г. Д. Никифоров. – Москва: Машиностроение, 1972. – 264 с.
3. **Фролов, В. В.** Дуговая сварка алюминия / В. В. Фролов. – Харьков: Технология, 2003. – 92 с.
4. **Цыганков, И. И.** Особенности формирования обратного валика стыкового сварного соединения на тонкостенных корпусах конусно-цилиндрической формы из сплавов системы Al-Mg-Cu / И. И. Цыганков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 174.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Артур Олегович Коротеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-45-49-70.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Александр Григорьевич Лупачев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Игорь Иванович Цыганков, Белорусско-Российский университет.

Artur Olegovich Koroteyev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-45-49-70.

Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Alexander Grigoryevich Lupachev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Igor Ivanovich Tsygankov, Belarusian-Russian University.

УДК 629.3.015.5

Д. А. Линник

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ РАБОЧЕГО МЕСТА ВОДИТЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

UDC 629.3.015.5

D. A. Linnik

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF THE SYSTEM FOR VIBRATION PROTECTION OF A WHEELED TRACTOR DRIVER'S WORKPLACE

Аннотация

Приведен аналитический обзор литературы по вопросам влияния вибрации на организм человека (водителя колесного трактора). Рассматривается конструкция опытной подвески кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1». Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность разработанной подвески кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1».

Ключевые слова:

вибрация, колесный трактор, водитель, рабочее место, опытный амортизатор, подвеска кабины, пол кабины, подушка сиденья, среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения.

Abstract

An analytical review of the literature on the effects of vibration on the human body (a wheeled tractor driver) is presented. The design of the experimental cabin suspension for a Belarus-3022DC.1 wheeled tractor is considered. The results of the experimental studies are presented, confirming the effectiveness of the developed cabin suspension for the Belarus-3022DC.1 wheeled tractor

Keywords:

vibration, wheeled tractor, driver, workplace, experimental shock absorber, cab suspension, cab floor, seat cushion, rms value of corrected vibration acceleration.

В настоящее время вибрация является одним из наиболее часто исследуемых эргономических факторов, влияющих на здоровье работников и эффективность их работы. Во всем мире миллионы людей подвергаются механическим вибрациям во время работы. Влияние вибрации имеет решающее значение с точки зрения здоровья человека, комфорта при работе, производительности труда, качества работы и безопасности труда. Длительное воздействие общей вибрации всего тела может вызвать серьезные проблемы со здоровьем, включая проблемы с позвоночником и болью в пояснице, в зависимости

от величины, частоты, направления, продолжительности и распределения вибрации по телу человека [1, 18].

Действию общей вибрации подвергается весь организм человека-оператора через пол, сиденье, при работе на транспорте, сельскохозяйственной и горнодобывающей технике, обслуживании технологического оборудования. Чаще всего действию вибрации рабочих мест подвергаются механизаторы сельского хозяйства, водители большегрузных машин, бульдозеристы, машинисты экскаваторов и буровых станков. Для современного производства характерны относительно низкие уровни вибрации с

преобладанием низкочастотного спектра в октавах 1...8 Гц [2, 3, 18].

По частотному составу вибрацию подразделяют на низкочастотную (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах 1...4 Гц – для общей вибрации, 8...16 Гц – для локальной), среднечастотную (8...16 Гц – для общей вибрации, 31,5...63 Гц – для локальной) и высокочастотную (31,5...63 Гц – для общей вибрации, 125...1000 Гц – для локальной) [4–6, 18].

Вибрация рабочих мест водителей транспортных средств и самоходной техники носит преимущественно низкочастотный характер с высокими уровнями интенсивности (до 132 дБ) и зависит от скорости передвижения, типа сидения и амортизирующей системы, степени изношенности подвижного состава и покрытия дорог, выполняемого технологического процесса [4, 18].

Низкочастотные вибрации, в отличие от высокочастотных, активно распространяются по всему телу человека, являясь резонансными для многих органов и систем [2–5, 7, 8].

Из аналитического обзора литературы по вопросам исследования физиологического состояния водителей колесных тракторов разных фирм установлено, что колебания с частотой до 3...5 Гц вызывают реакции вестибулярного аппарата [9, 10].

При работе на сельскохозяйственных транспортных средствах водители сталкиваются с физическими (шум, вибрация (высоко- и низкочастотная)), химическими (химические вещества в воздухе, выхлопные газы), биологическими (споры, микроорганизмы) и другими видами воздействий [11, 18].

Мощность трактора и скорость движения постоянно увеличиваются, что приводит к возрастанию динамической нагрузки деталей шасси и трансмиссии и повышению уровня вибрации, создаваемой этими деталями. Вибрационные нагрузки негативно влияют на детали и узлы трактора, окружающую

среду и водителя. Это приводит к повышенной утомляемости водителя и увеличению количества ошибок управления, которые влияют на производительность трактора. При длительном воздействии вибраций профессиональные заболевания водителя развиваются довольно часто. Поэтому в современных тракторах большое внимание уделяется защите водителя от шумов и вибраций, создаваемых двигателем, шасси и рабочими машинами, с помощью различных рам, подвесок кабины и сидений [12].

Анализ зарубежных конструкций систем поддрессоривания кабин колесных тракторов (*John Deere, New Holland, Fendt, Challenger, Steyr, Renault, Diamond, Rubin* и др.) позволил сделать вывод, что зарубежные производители колесных тракторов уделяют повышенное внимание улучшению условий труда водителя, обусловленное использованием в подвеске кабины колесного трактора конструктивных элементов, обладающих нелинейными характеристиками (гидравлические, пневматические и пневмогидравлические конструктивные элементы систем поддрессоривания кабин), а также активных виброзащитных систем, что в свою очередь повышает конкурентоспособность производимых колесных тракторов на мировом рынке.

Классическая конструкция современных колесных тракторов, производимых в Республике Беларусь, не предусматривает подвеску заднего моста. Упругими элементами для задней оси являются крупногабаритные шины. Кабина колесного трактора крепится к остоу через отечественные или импортные виброизоляторы, которые являются фильтрами высокочастотных вибраций, генерируемых двигателем и трансмиссией, и больше играют роль шумопоглощающих элементов и не выступают гасителями низкочастотных вибраций. В этом случае гашение низкочастотных вибраций будет осуществляться только за счет подвески сиденья

водителя колесного трактора. Поэтому конструкция системы поддрессоривания кабины колесного трактора требует своего совершенствования.

Кабина колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» устанавливается на остов через четыре виброизолятора: спереди на два виброизолятора, установленные на кронштейне крепления кабины к корпусу муфты сцепления; сзади на два виброизолятора, установленные на кронштейне крепления кабины к корпусу полуоси заднего моста [13].

Жесткость виброизолятора кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» определялась в ходе лабораторных испытаний, которые проводились на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Белкард». Для испытаний виброизолятора была использована испытательная установка с компьютерным управлением *VDA-1001K* фирмы *Wahl*. По результатам испытаний была получена зависимость статической деформации виброизолятора (Δ) от приложенного усилия. Средняя жесткость виброизолятора кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» составила $8,45 \cdot 10^5$ Н/м, а $\Delta = 8$ мм.

Для определения твердости резинового слоя виброизолятора кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» был использован переносной твердомер 2033 ТИР, предназначенный для измерения твердости резины по Шору А. Определение твердости по Шору А осуществлялось в соответствии с ГОСТ 263-75 [14]. По результатам испытаний была определена твердость резинового слоя виброизолятора по Шору А – *HSh 45*.

Следовательно, можно сделать вывод, что виброизолятор кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1», при его жесткости $8,45 \cdot 10^5$ Н/м, статической деформации, равной 8 мм, и твердости *HSh 45*, не обладает необходимыми демпфирующими свойствами для гашения низкочастотной вибрации, переда-

ваемой от остова кабине колесного трактора в диапазоне частот 1...4 Гц [4–6].

С целью повышения эффективности системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора, обеспечения взаимозаменяемости с существующей конструкцией на ОАО «Белкард» была изготовлена конструкция опытной подвески кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1», которая состоит из четырех стоек, каждая из которых включает опытный демпфер и кронштейн. Внешний вид одной из четырех стоек подвески кабины представлен на рис. 1.

Конструкция кронштейна стойки обеспечивает взаимозаменяемость с виброизолятором кабины.

Конструкция опытной подвески кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» обеспечивает вертикальное перемещение кабины до 50 мм. Такой ход кабины не будет оказывать никакого влияния на:

- рулевое управление, т. к. на тракторе «Беларус-3022ДЦ.1» предусмотрена установка гидрообъемного рулевого управления, которое состоит из: реверсного насоса-дозатора (установленного на кабине); насоса-дозатора переднего хода (установленного на двигателе); гибкой гидравлической магистрали к реверсному насосу-дозатору; маслобака; крана реверса; всасывающей магистрали; цилиндрических магистралей; насоса; нагнетающей магистрали [13];

- педаль управления подачей топлива, т. к. подача топлива осуществляется электронно [13];

- педаль управления сцеплением, т. к. она имеет гидравлическую систему управления [13];

- педали управления левым и правым тормозами, т. к. они имеют гидравлическую систему управления [13];

- управление переключением передач, т. к. оно осуществляется посредством электронно-гидравлической системы управления [13];

- стояночную тормозную систему,

т. к. она имеет механический привод (тягой) [13].

Конструкция опытного демпфера

кабины колесного трактора представлена на рис. 2.

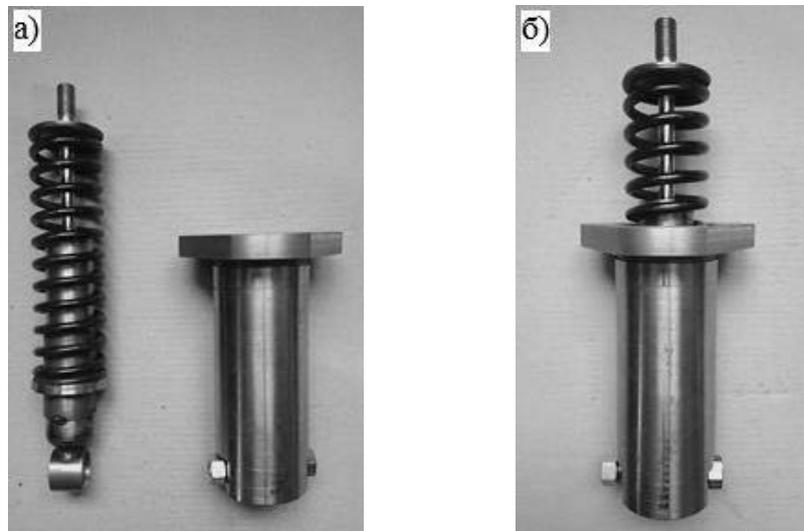


Рис. 1. Внешний вид одной стойки опытной подвески кабины колесного трактора: а – опытный демпфер в сборе и кронштейн; б – стойка в сборе

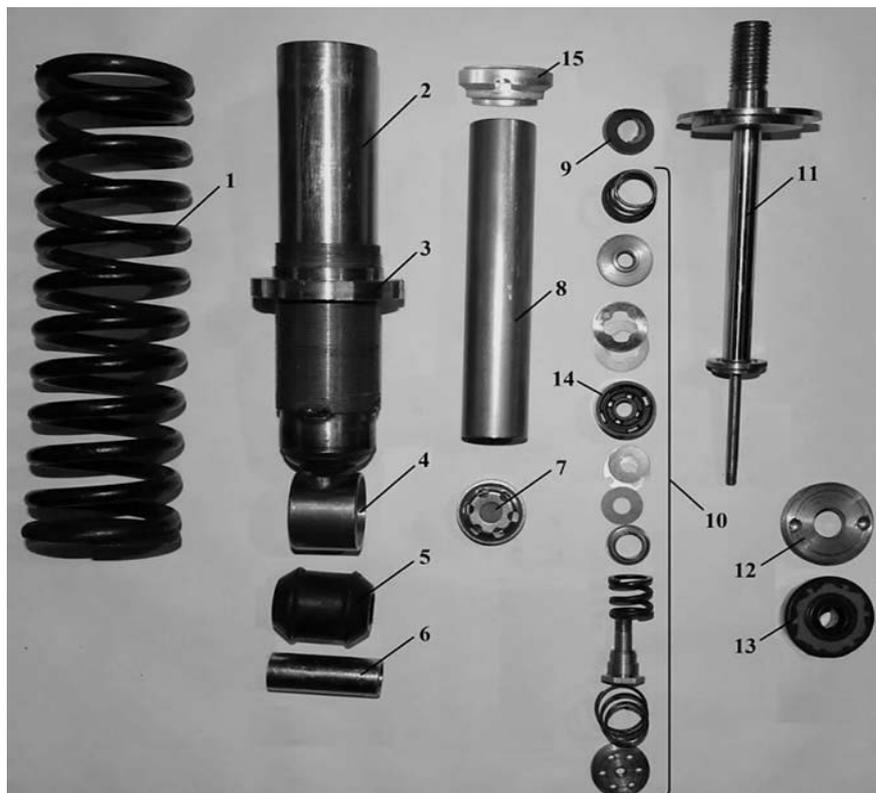


Рис. 2. Конструкция опытного демпфера кабины колесного трактора: 1 – цилиндрическая пружина; 2 – резервуар амортизатора в сборе; 3 – гайка пружины; 4 – проушина; 5 – резиновая втулка; 6 – втулка шарнира; 7 – клапан сжатия в сборе; 8 – цилиндр; 9 – буфер хода отбоя; 10 – детали поршневого узла; 11 – шток в сборе; 12 – гайка резервуара; 13 – сальник штока; 14 – поршень; 15 – направляющая втулка

Амортизатор опытного демпфера имеет оригинальную конструкцию поршневого узла, которая обусловлена включением в конструкцию двух конических пружин 1 и 2 (рис. 3). Конические пружины 1 и 2 обеспечивают перемещение поршня по поршневой шейке на ходах сжатия и отбоя с целью управления силой вязкого сопротивления амортизатора. Управление силой

вязкого сопротивления амортизатора осуществляется за счет создания сопротивления пружинами поршня в момент перекрытия ими дополнительных дросселирующих отверстий в опытном поршневом узле (см. рис. 3), что обеспечивает резкое нарастание силы вязкого сопротивления при низкочастотной вибрации (1...4 Гц) и повышение демпфирования колебаний.

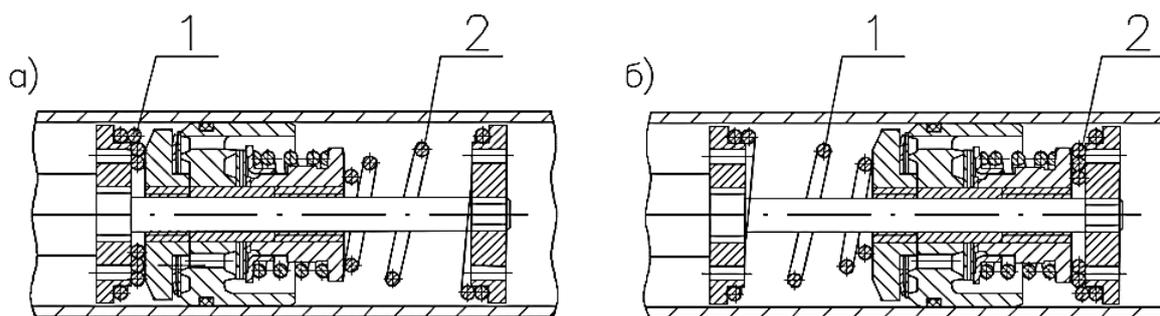


Рис. 3. Поршневой узел опытного амортизатора: а – ход сжатия; б – ход отбоя; 1 – верхняя пружина поршня; 2 – нижняя пружина поршня

Для определения силы вязкого сопротивления опытного амортизатора за основу были приняты экспериментальные данные, которые были получены в ходе проведения лабораторных испытаний опытного амортизатора на установке с компьютерным управлением VDA-1001K фирмы *Wahl* на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Белкард». В результате математических вычислений было составлено уравнение, описывающее силу вязкого сопротивления опытного амортизатора:

$$R_{\text{ам}} = 8245,10 \cdot \dot{z} + 9354,53 \cdot \dot{z}^2 - 28581,63 \cdot \dot{z}^3 + 168156,10 \cdot z - 29872312,54 \cdot z^2 + 1024041517,61 \cdot z^3, (1)$$

где \dot{z} – скорость поршня опытного амортизатора, м/с; z – деформация пружин поршневого узла опытного

амортизатора, м.

С целью проверки работоспособности и эффективности предложенной конструкции опытной подвески кабины колесного трактора были проведены экспериментальные исследования. Опытная подвеска кабины была установлена на колесный трактор «Беларус-3022ДЦ.1». На рис. 4 представлен пример заднего крепления кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с помощью опытной стойки подвески на кронштейне корпуса полуоси заднего моста.

Общая длительность воздействия вибрации на водителя колесного трактора в течение рабочего дня была получена для каждого рабочего цикла с учетом соответствующих рабочих условий; оценка длительности основана на фактическом измерении длительности вибрационного воздействия во время выполнения конкретных рабочих циклов с учетом их повторяемости в течение рабочего дня. Полученные результаты измерений

усредняли. Усредненное среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения для серии из N выборок

определяли по ГОСТ 31319–2006 (ЕН 14253:2003) [15].

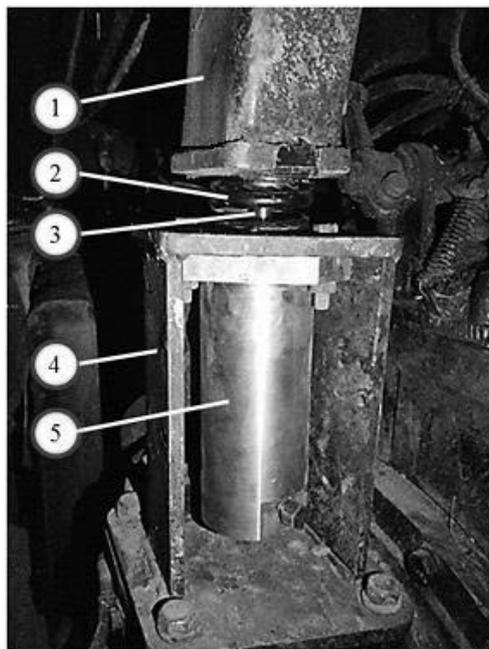


Рис. 4. Заднее крепление кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с помощью опытной стойки подвески на кронштейне корпуса полуоси заднего моста: 1 – опора кабины; 2 – цилиндрическая пружина; 3 – шток амортизатора; 4 – кронштейн крепления кабины к корпусу полуоси заднего моста; 5 – кронштейн стойки подвески

Рабочие условия и испытательные участки были определены с точки зрения реальных условий работы колесного трактора. Варьируемыми параметрами, определяющими рабочие условия, являлись скорость передвижения колесного трактора в заданном режиме работы и тип поверхности передвижения.

Режим работы определялся видом выполняемых работ. В данном случае – это работа по перевозке и внесению органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20. Продолжительность рабочего дня составляла 8 ч (480 мин).

Испытательные участки выбирались таким образом, чтобы длина пути на этом участке, где оценивалась общая вибрация, была достаточной для передвижения колесного трактора с постоянной скоростью в течение не менее 3 мин (180 с) в разных рабо-

чих условиях [15, 16].

В качестве испытательных участков были определены естественные участки пути с разными типами поверхности передвижения: асфальтобетонная дорога (рис. 5, а), грунтовая (полевая) дорога (рис. 5, б), поле под посев (рис. 5, в) [18].

Для измерения среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте водителя использовался поверенный шумомер-вибромметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А (НФ-Белая) с трехкомпонентным датчиком АР2038Р-10.

С целью измерения среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте водителя были выбраны места (точки) установки датчика АР2038Р-10: подушка сиденья и опорная поверхность для ног (пол кабины) (рис. 6) [15–18].

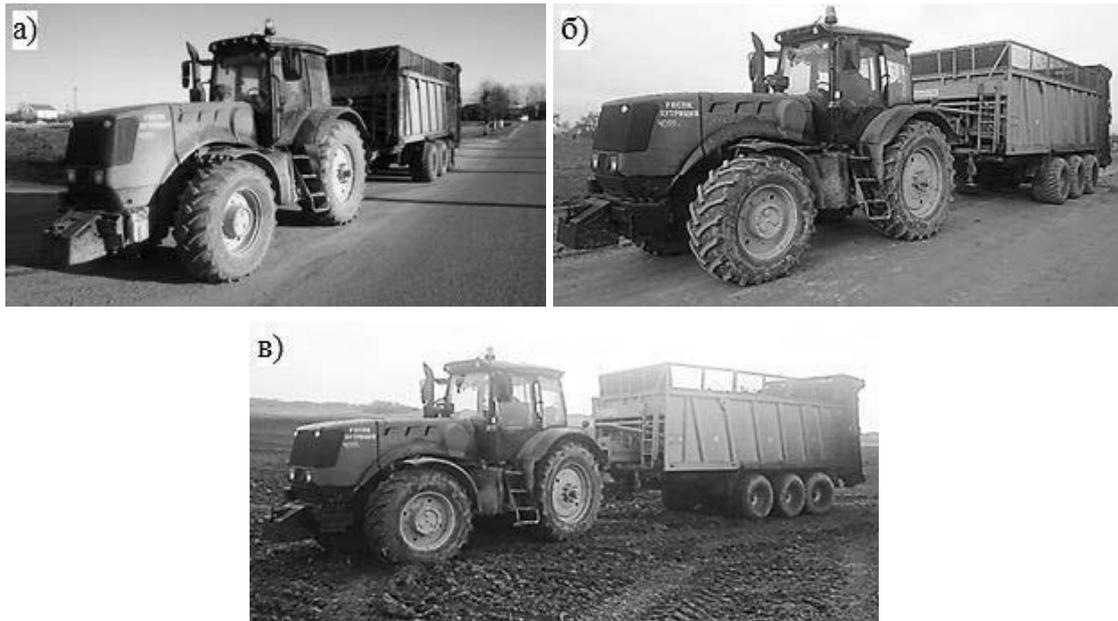


Рис. 5. Испытательные участки с разными типами поверхности передвижения: а – асфальтобетонная дорога; б – грунтовая (полевая) дорога; в – поле под посев

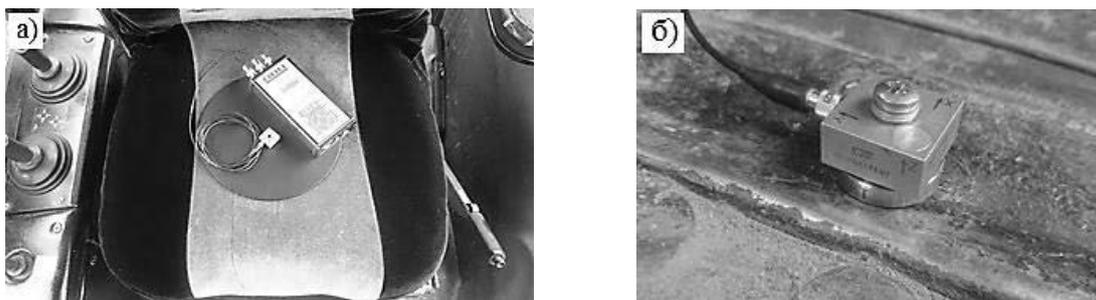


Рис. 6. Места установки датчика AP2038P-10: а – подушка сиденья; б – опорная поверхность для ног (пол кабины)

При измерении вибрации, передающейся через сиденье водителю, датчик AP2038P-10 устанавливался в центре полужесткого диска, который размещался на поверхности сиденья таким образом, чтобы датчик находился посередине между сидельными буграми сидящего человека (см. рис. 6, а). Сиденье было отрегулировано с учетом массы водителя так, чтобы водителю было удобно работать с органами управления и исключить риск ударов о верхний и нижний ограничители хода подвески [16–18].

При измерении вибрации, воздей-

ствующей на ноги водителя, датчик AP2038P-10 размещался на опорной поверхности для ног (пол кабины) посередине между сводами его ступней (см. рис. 6, б).

На рис. 7 отражены результаты измерений среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в вертикальном направлении (ось Z) в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8-часового рабочего дня при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прице-

пом ПСС-20 по асфальтобетонной дороге (см. рис. 5, а) со скоростью 20 км/ч. Позиции 1 и 2 на рис. 7–9 соответствуют полученным результатам экспериментальных исследований для суще-

ствующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора, а позиции 4 и 5 – для модернизированной системы виброзащиты.

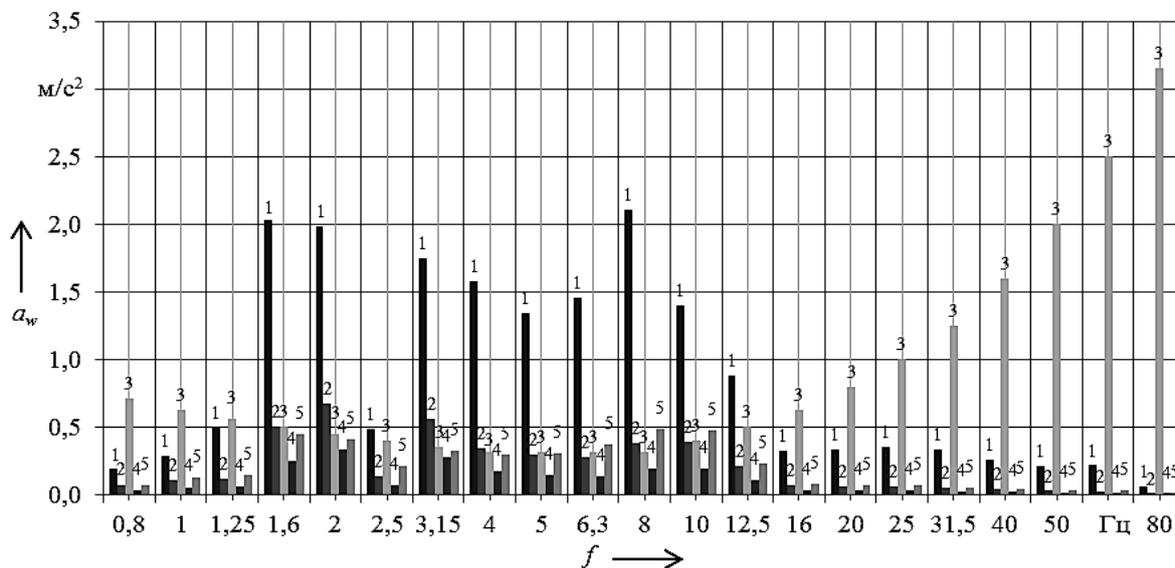


Рис. 7. Среднеквадратические значения скорректированного виброускорения при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по асфальтобетонной дороге со скоростью 20 км/ч: 1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНиП от 26.12.2013 г. № 132 [6]; 4 – подушка сиденья; 5 – пол кабины

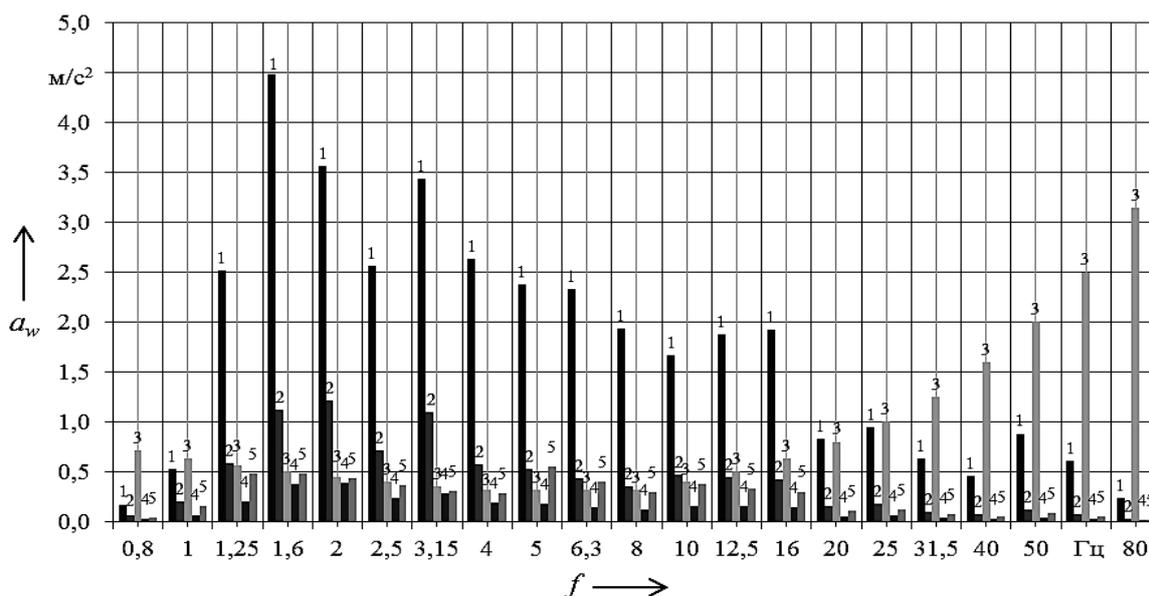


Рис. 8. Среднеквадратические значения скорректированного виброускорения при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по грунтовой (полевой) дороге со скоростью 10 км/ч: 1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНиП от 26.12.2013 г. № 132 [6]; 4 – подушка сиденья; 5 – пол кабины

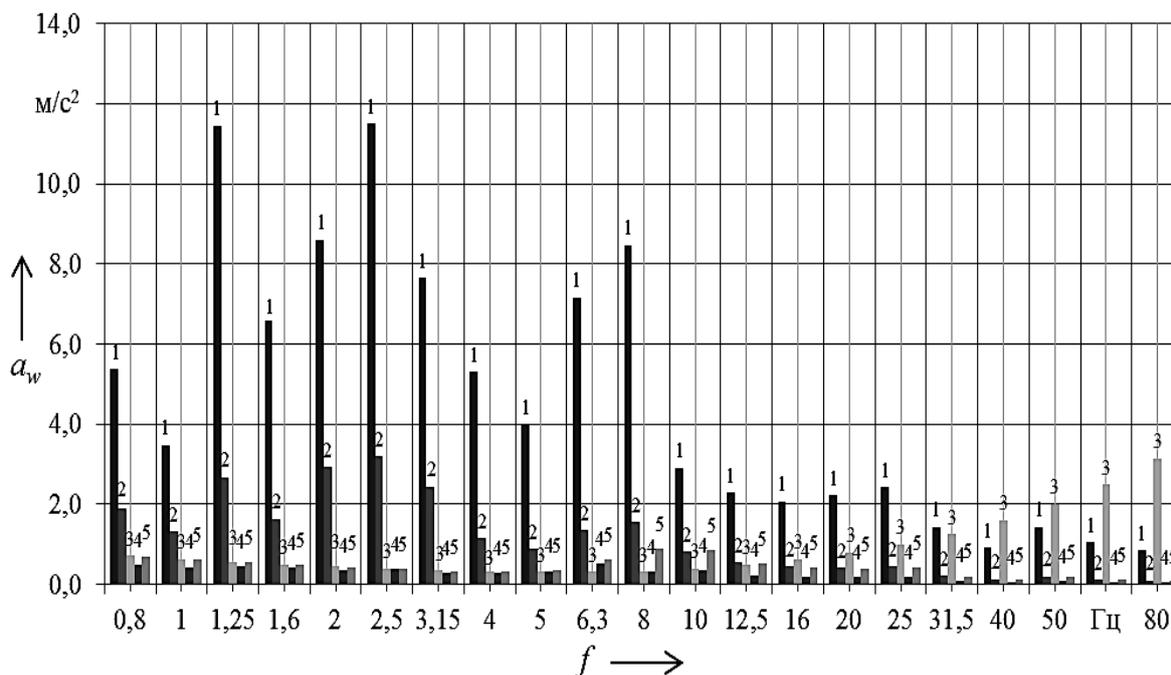


Рис. 9. Среднеквадратические значения скорректированного виброускорения при возвращении на загрузку органических удобрений колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по полю со скоростью 7 км/ч: 1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНиП от 26.12.2013 г. № 132 [6]; 4 – подушка сиденья; 5 – пол кабины

На рис. 8 представлены результаты измерений среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в вертикальном направлении в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8-часового рабочего дня при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по грунтовой (полевой) дороге (см. рис. 5, б) со скоростью 10 км/ч.

На рис. 9 проиллюстрированы результаты измерений среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в вертикальном направлении в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8-часового рабочего дня при возвращении на загрузку органических удобрений колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прице-

пом ПСС-20 (см. рис. 5, в) по полю со скоростью 7 км/ч.

Выводы

1. Разработан и изготовлен опытный демпфер кабины колесного трактора, состоящий из цилиндрической пружины и опытного гидравлического двухтрубного амортизатора, отличающегося от существующих включением в конструкцию поршневого узла двух конических пружин, обеспечивающих перемещение поршня по поршневой шейке на ходах сжатия и отбоя с целью изменения силы вязкого сопротивления, что позволяет повысить эффективность гашения низкочастотной вибрации, передаваемой на кабину колесного трактора.

2. Получена функциональная зависимость, описывающая силу вязкого сопротивления опытного амортизатора с оригинальной конструкцией поршневого узла.

3. Опытная подвеска кабины колесного трактора позволяет обеспечивать взаимозаменяемость с существующей конструкцией.

4. Разработано и предложено конструктивное решение опытной подвески кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1», отличающейся тем, что вместо виброизолятора кабины применены упругий элемент, опытный амортизатор и кронштейн, позволяющие снижать среднеквадратические значения коррек-

тированного виброускорения в третьоктавных полосах частот (1...4 Гц) в вертикальном направлении на рабочем месте водителя колесного трактора на 70...75 %, что дает возможность повысить эффективность гашения низкочастотной вибрации на рабочем месте водителя колесного трактора. Экономия от внедрения авторского демпфера снижает производственный травматизм и профзаболевания и в год составляет 456 тыс. р.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Melemez, K.** The role of scat suspension in whole-body vibration affecting skidding tractor operators / K. Melemez, M. Tunay, T. Emir // Journal of Food, Agriculture & Environment. – 2013. – Vol. 11 (1). – P. 1211–1215.
2. **Артамонова, В. Г.** Профессиональные болезни : учебник / В. Г. Артамонова, Н. А. Мухин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Медицина, 2004. – 480 с.
3. Профессиональные заболевания: в 2 т. / Н. Ф. Измеров [и др.] ; под ред. Н. Ф. Измерова. – Москва: Медицина, 1996. – Т. 2. – 480 с.
4. Гигиена труда: учебник / Под ред. Н. Ф. Измерова, В. Ф. Кириллова. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 592 с.
5. Профессиональные болезни: учебник для студентов учреждений высшего проф. образования / Н. Ф. Измеров [и др.] ; под ред. Н. Ф. Измерова. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2013. – 464 с.
6. Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий», Гигиенического норматива «Предельно допустимые и допустимые уровни нормируемых параметров при работах с источниками производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий» [Электронный ресурс]: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 26 дек. 2013 г., № 132; внес. доп. 15 апр. 2016 г. № 57 // М-во здравоохранения Республики Беларусь: нормативно-правовая база. – Режим доступа: <http://minzdrav.gov.by/ru/dlya-spetsialistov/normativno-pravovaya-baza/tekhnicheskie-normativnye-pravovye-akty/teksty-tekhnicheskikh-normativny-kh-aktov/sanitarnye-normy-pravila-i-gigienicheskie-normativy-reglamentiruyushche-osnovnye-trebovaniya-pri-vo.php>. – Дата доступа: 12.03.2019.
7. **Косарев, В. В.** Профессиональные болезни : учебное пособие / В. В. Косарев, С. А. Бабанов. – Москва: Вузовский учебник; ИНФА-М, 2013. – 252 с.
8. Профессиональная патология : национальное руководство / Под ред. Н. Ф. Измерова. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2011. – 784 с.
9. **Микулик, Т. Н.** Исследование влияния параметров сиденья на вибронегруженность оператора / Т. Н. Микулик, Г. Н. Рейзина // Грузовик. – 2014. – № 4. – С. 30–32.
10. **Микулик, Т. Н.** К методике повышения активной виброзащиты с использованием функциональной диагностики / Т. Н. Микулик, Г. Н. Рейзина // Наука и техника. – 2014. – № 6. – С. 26–30.
11. **Cutini, M.** Whole-Body Vibration in Farming: Background Document for Creating a Simplified Procedure to Determine Agricultural Tractor Vibration Comfort / M. Cutini, M. Brambilla, C. Bisaglia // Agriculture. – 2017. – Vol. 7, iss. 84. – 20 p.
12. **Pobedin, A. V.** Decrease of the Vibration Load Level on the Tractor Operator Working Place by Means of Using of Vibrations Dynamic Dampers in the Cabin Suspens / A. V. Pobedin, A. A. Dolotov, V. V. Shekhovtsov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1252–1257.
13. **Рунов, А. В.** Трактор «БЕЛАРУС-3022ДЦ.1» : руководство по эксплуатации / А. В. Рунов. – Минск : Минский тракторный завод, 2015. – 400 с.
14. **ГОСТ 263–75 (СТ СЭВ 1198–78).** Резина. Метод определения твердости по Шору А. – Введ. 01.01.1977. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1977. – 6 с.

15. **ГОСТ 31319–2006 (ЕН 14253:2003)**. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. – Введ. 30.06.2008. – Москва : Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 23 с.
16. **ГОСТ 31193–2004 (ЕН 1032:2003)**. Вибрация. Определение параметров вибрационной характеристики самоходных машин. Общие требования. – Введ. 30.06.2008. – Москва: Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 30 с.
17. **ГОСТ 31191.1–2004 (ИСО 2631-1:1997)**. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 30.06.2008. – Москва: Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 29 с.
18. **Линник, Д. А.** Влияние системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора на развитие профессиональных заболеваний / Д. А. Линник, А. С. Воронцов // *Изобретатель*. – 2019. – № 7 (235). – С. 32–39.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Дмитрий Александрович Линник, ст. преподаватель, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы. E-mail: d.linnik@grsu.by.

Dmitry Alexandrovich Linnik, senior lecturer, Yanka Kupala State University of Grodno. E-mail: d.linnik@grsu.by.

УДК 621.793.092

М. И. Лискович

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО СОВМЕСТНОЙ ВЫТЯЖКОЙ

UDC 621.793.092

M. I. Liskovich

EQUATIONS FOR CALCULATING THE PRESSURE OF COMPRESSION WHEN PRODUCING A COATING BY USING COMBINED DRAWING

Аннотация

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование силовых параметров процесса совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия.

Получена пригодная для практического применения расчетная зависимость величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

Ключевые слова:

металлопорошковые покрытия, плотность, пористость, давление прессования порошка.

Abstract

A theoretical and experimental study of the force parameters of the process of combined drawing of a metal base and a metal powder coating has been carried out.

A calculated dependence of the value of a combined drawing force on the main process parameters has been obtained that is suitable for practical use.

Keywords:

metal powder coatings, density, porosity, pressure of powder compression.

Введение

Свойства любых металлопорошковых изделий и покрытий существенно зависят от их плотности и пористости, которые, в свою очередь, зависят от давления прессования.

Процесс прессования порошков является сложным процессом упруго-пластического деформирования огромного числа частиц, при котором и относительное расположение частиц, и картина их упругого взаимодействия беспрерывно изменяются.

Основная часть

В теории прессования металличе-

ских порошков при выводе основного уравнения прессования, связывающего давление и плотность, существуют два основных направления.

Первое из них характеризуется введением целого ряда упрощающих допущений, которые позволяют решать ту или иную задачу элементарным путем, предлагая во многих случаях достаточно простые уравнения, описывающие рассматриваемый процесс с удовлетворяющей нужды практики степенью точности. Сюда входят теории прессования, основанные на использовании гипотезы сплошности, которая предполагает отсутствие разрывов в уплотняемой среде, т. е. ее непрерывность, что в целом противоречит пред-

ставлениям о дискретном строении порошковых тел.

Второе направление характеризуется большей математической точностью и физической обоснованностью решения. Оно предлагает для описания процессов уплотнения весьма сложные зависимости и далеко не всегда приводит к результатам, которые могут быть использованы в инженерной практике. К этому направлению относятся теории, основанные на изучении контактных явлений при взаимодействии частиц.

Четко разграничить эти направления нельзя, т. к. они зачастую взаимно дополняют друг друга.

Рядом авторов предложены различные математические уравнения, характеризующие процесс прессования [1, 2].

Это и К. Конопицкий:

$$A \lg \tau = p + \lg \tau_p = 0,$$

где A – константа; τ_p – относительная плотность порошка в состоянии насыпки, и Г. Смит:

$$\rho_n = k p^{1/3} + \rho_n,$$

где ρ_n – плотность спрессованного брикета; ρ_n – насыпная масса порошка; p – давление прессования; k – фактор уплотнения, и К. Агте:

$$\rho_n = k p^{1/n} + \rho_n,$$

где ρ_n – объем утряски порошка; n – числовой коэффициент ($n = 2 \dots 5$); ρ_n – плотность компактного материала.

Наиболее часто применяется уравнение М. Ю. Бальшина [3]

$$m \lg \tau = - \lg p + \lg p_{\max},$$

где τ – относительная плотность; p_{\max} – давление, соответствующее максимальному уплотнению до компактно-

го состояния; m – константа (фактор прессования).

Предложив уравнение прессования, М. Ю. Бальшин отметил, что значения фактора прессования существенно изменяются даже в не очень больших интервалах давлений, в связи с чем попытки дать уравнение прессования с постоянными коэффициентами для всех порошков и во всем интервале давлений обречены на неудачу. Однако в ряде случаев можно получить уравнения с коэффициентами, более или менее постоянными в достаточно широком интервале давлений.

Общее число уравнений прессования, приведенных разными авторами для разных типов порошков и процессов прессования, исчисляется несколькими десятками.

Все они чаще всего были получены эмпирически, путем математической обработки экспериментальных зависимостей, поэтому они могут с достаточной степенью точности описывать процесс прессования лишь тех порошков и при тех условиях прессования, для которых они были получены.

Поэтому для нового способа изготовления полых композиционных изделий совместной вытяжкой покрытия и основы [4] было необходимо разработать уравнение прессования, которое с удовлетворяющей точностью описывало бы его.

Способ, разработанный в ГГТУ им. П. О. Сухого, позволяет получать цельноштампованные композиционные втулки с повышенной по сравнению с получаемыми гибкой и калибровкой точностью размеров. Заключается он в следующем. Полученная предварительной вытяжкой полая металлическая заготовка 1 устанавливается на матрицу 2 (рис. 1). Между боковыми стенками заготовки и пуансоном 3 засыпается порошок 4, и перемещением пуансона осуществляют совместную вытяжку металлической основы и материала покрытия, получая композиционное

изделие 5 (рис. 2).

Наиболее обстоятельно напряженное состояние при вытяжке листового металла в различных участках очага деформации изучено Е. А. Поповым [5, 6]. В приведенную им методику и расчёт-

ные зависимости были внесены дополнения и видоизменения таким образом, чтобы сделать возможным учет влияния процесса деформации порошкового материала на процесс деформации основы.

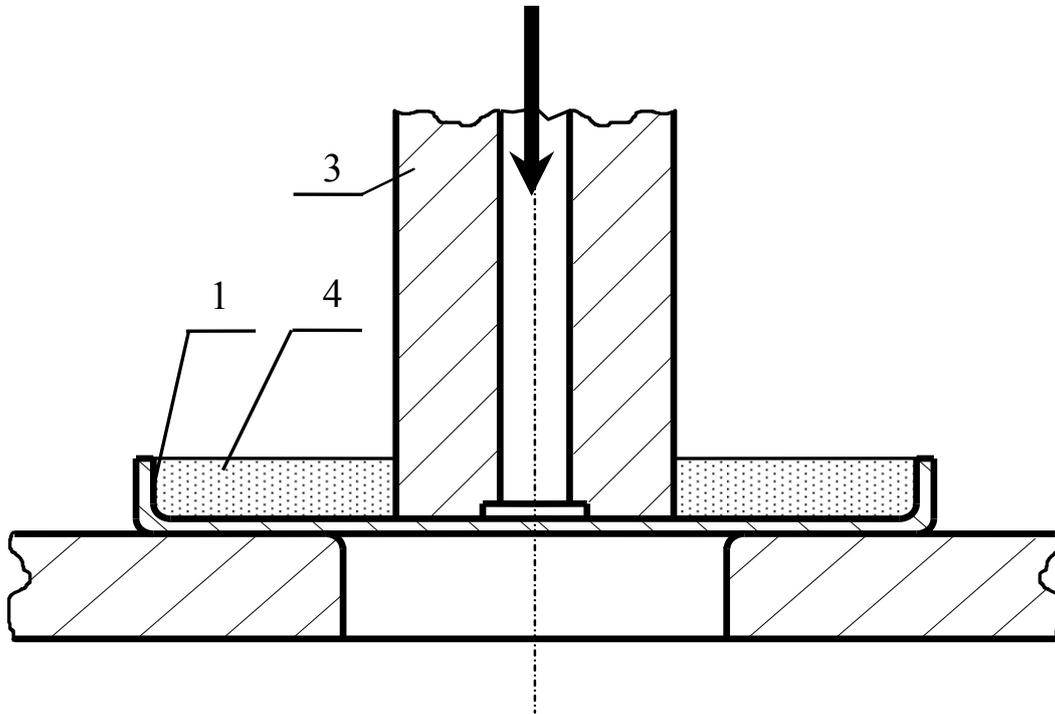


Рис. 1. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы

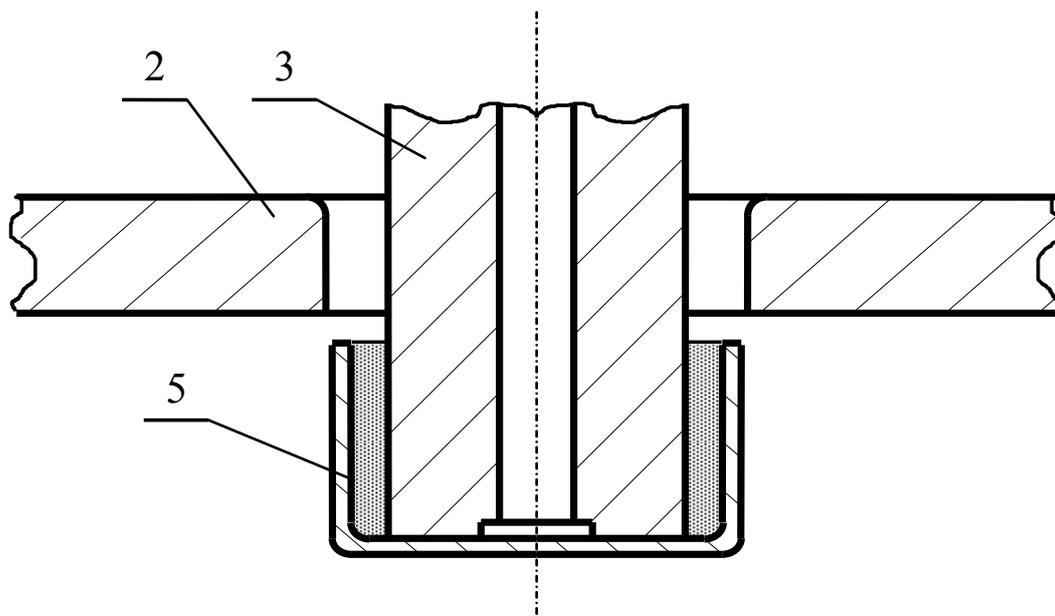


Рис. 2. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы после получения композиционного изделия

Усилие совместной вытяжки будем определять в следующем виде:

$$P = \sigma_{p_{\max}} \cdot \pi \cdot (D_m - s) \cdot s + P_{mp}, \quad (1)$$

где первое слагаемое учитывает величину усилия, необходимого для вытяжки основы с учётом влияния давления и сил трения со стороны порошка; P_{mp} – усилие, затрачиваемое на трение порошка по пуансону; $\sigma_{p_{\max}}$ – макси-

мальное растягивающее напряжение, действующее в материале основы, направление которой показано на рис. 3; D_m – диаметр цилиндрического отверстия в матрице; s – толщина материала основы.

Для определения σ_{ρ_0} используем зависимость, приведённую Поповым [5, с. 377]:

$$\sigma_{\rho_0} = \sigma_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_m} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_p} \right) \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right\}, \quad (2)$$

где σ_{S_0} – сопротивление материала основы пластическому деформированию; α – угол наклона рабочей поверхности матрицы к вертикали; f_m – коэффициент трения основы по матрице; R_1 – радиус среднего слоя основы в начале конического участка:

$$R_1 = R_3 - R_p (1 - \cos \alpha);$$

R_p – радиус кривизны срединной поверхности основы в меридианном сечении на участке перехода цилиндрической части заготовки основы в коническую, для определения которого используется зависимость [5, с. 355]

$$R_p = \frac{\sqrt{R_3 \cdot s}}{\sqrt{2} \cdot \sin \alpha};$$

R_3 – радиус полой заготовки основы по среднему слою,

$$R_3 = \frac{D_0 - s}{2},$$

где D_0 – наружный диаметр заготовки основы;

При совместной вытяжке радиальное напряжение будем определять по формуле

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho_0} + \sigma_{don},$$

где σ_{don} – дополнительное напряжение, необходимое на преодоление сил трения между порошком и основой и дополнительных сил трения между основой и матрицей за счет прижима основы и матрицы давлением p .

Поэтому дополним (2) слагаемым, учитывающим $\sigma_{don_{\max}}$ – максимальное дополнительное напряжение, необходимое на преодоление сил трения между порошком и основой и увеличение сил трения между основой и матрицей за счет прижима основы к матрице давлением p :

$$\sigma_{P_{\max}} = \sigma_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_m} \right) \left[1 - \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_p} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} + \frac{s}{2R_1 + s} + \frac{\sigma_{\text{дон}_{\max}}}{\sigma_{S_0}} \right\} e^{f_m \alpha}. \quad (3)$$

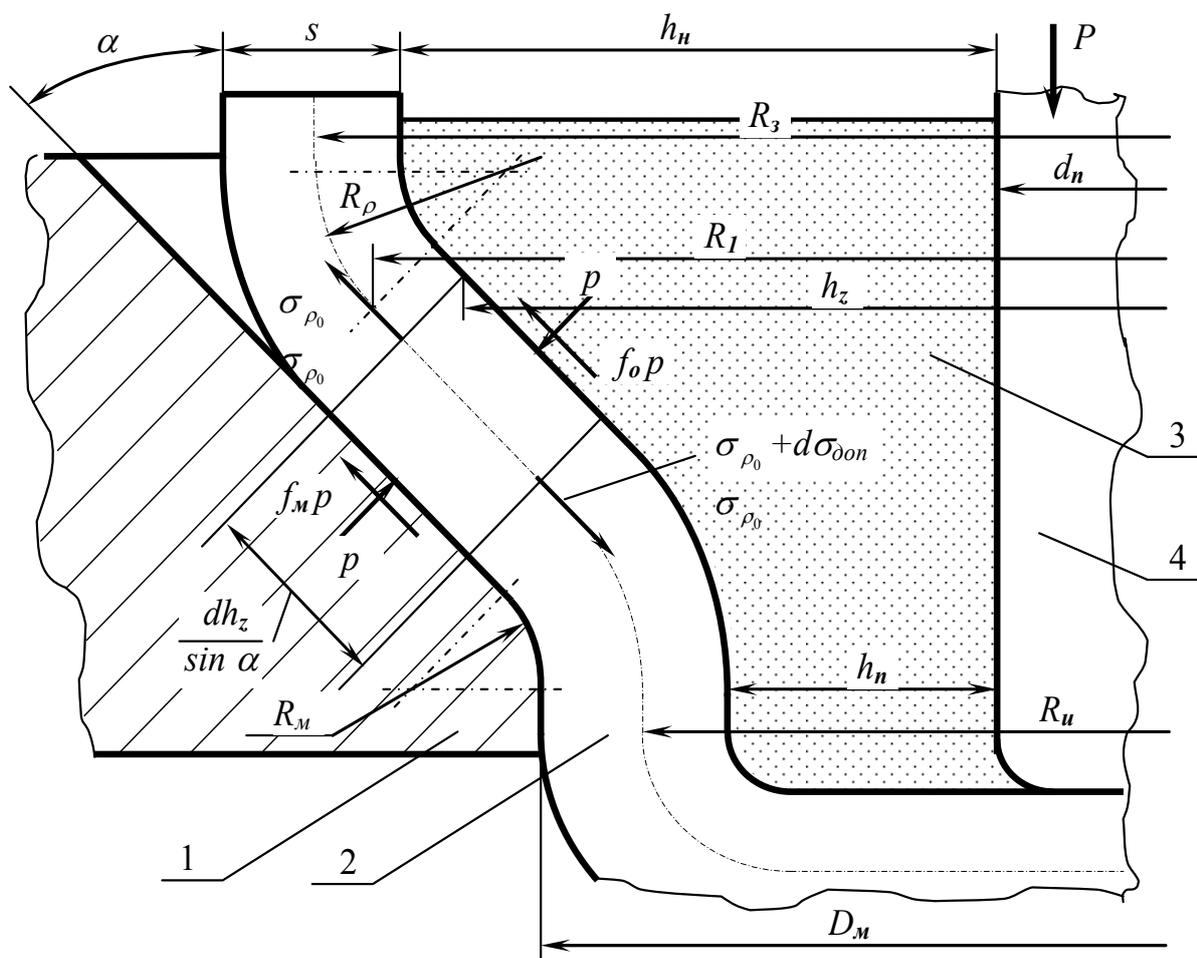


Рис. 3. Схема напряженного состояния при совместной вытяжке покрытия и основы: 1 – матрица; 2 – металлическая основа; 3 – металлопорошковый состав; 4 – пуансон

Величину $\sigma_{\text{дон}_{\max}}$ получим из условия равновесия кольцевого элемента основы толщиной s шириной $\frac{dh_z}{\sin \alpha}$

(см. рис. 3) после интегрирования, используя в качестве величины p давления порошка на основу полученную ранее зависимость [7, формула (6)], при $h_z = h_n$:

$$\sigma_{\partial on_{max}} = \frac{f_o + f_m}{s \cdot \cos \alpha} \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m h_n \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

где f_o – коэффициент трения между порошком и основой; h_n – толщина покрытия; h_n – начальная толщина порошкового слоя; v_n – относительная плотность покрытия; m – опытный коэффициент; σ_s – предел текучести основной металлической составляющей порошка; σ_{mc} – усредненное значение сопротивления деформации основной металлической составляющей порошка.

Величину дополнительного усилия P_{mp} , затрачиваемого на трение по

рошка по пуансону, определим, интегрируя касательные напряжения вдоль поверхности пуансона при изменении h_z в диапазоне от h_n до h_n :

$$P_{TP} = \frac{\pi \cdot f_{II} \cdot d_{II}}{\sin \alpha} \int_{h_n}^{h_n} p \, dh_z, \quad (5)$$

после интегрирования получим

$$P_{mp} = \frac{\pi \cdot f_n \cdot d_n}{\cos \alpha} \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m h_n \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

где d_n – диаметр пуансона.

Подставив в (1) значение $\sigma_{p_{max}}$ из (3) и значение P_{mp} из (6), получим

формулу для расчёта усилия совместной вытяжки:

$$P = \pi \cdot (D_m - s) \cdot s \cdot \sigma_{s_o} \left\{ \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_m} \right) \left[1 - \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_\rho} \right) \cdot \left(\frac{R_u}{R_1} \right)^{\frac{f_m}{\operatorname{tg} \alpha}} + \frac{s}{2R_m + s} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_{\partial on_{max}}}{\sigma_{s_o}} \right\} e^{f_m \alpha} + \frac{\pi \cdot f_n \cdot d_n}{\cos \alpha} \cdot \left(\frac{h_n}{h_n} v_n \right)^m \cdot \left\{ \left[\sigma_s + \sigma_{mc} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f_o - f_n} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{\frac{f_o + f_n - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right] + \frac{\sigma_{mc}}{f_o + f_n - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h_n}{h_n} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (7)$$

По формуле (7) рассчитаны значения усилия совместной вытяжки. Экспериментальные значения были получены при нанесении покрытия на полые стальные (сталь 08кпВГ) заготовки, получаемые предварительной вытяжкой из листовых заготовок толщиной 1,5 и диаметром 40 мм в штампе с пуансоном диаметром 22,9 мм, матри-

цей диаметром 26 мм, а также толщиной 1 и диаметром 19,5 мм в штампе с пуансоном диаметром 8 мм и матрицей 11 мм (рис. 4). В качестве материала наносимого покрытия использовались такие порошковые составы, как ЖГр2Д10 (железо 88,2 %, графит 1,8 %, медь 10 %) и ЖГр3 (железо 97 %, графит 3 %).

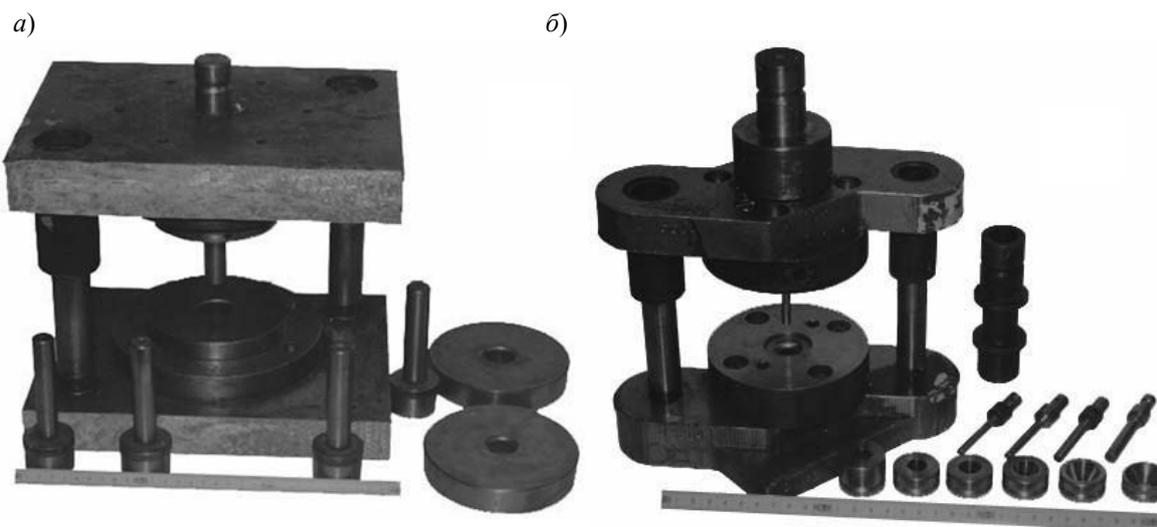


Рис. 4. Общий вид штампов, матриц и пуансонов для совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия

Таким образом, сравнение расчетных и опытных значений (рис. 5) свидетельствует о возможности использования полученной аналитической зависимости в практических расчетах. Ступенчатый характер средних опытных и расчетных значений вызван разными значениями толщин основы и различием механиче-

ских свойств материала основы.

Оценка значимости уравнения регрессии предложенной теоретической модели выполнена с использованием F -критерия Фишера [8]. Для проверки значимости сравниваются две дисперсии – регрессионная сумма $S^2_{рег}$ и остаточная сумма $S^2_{ост}$ (табл. 1):

$$S^2_{рег} = \frac{\sum P^2_{эксн} - \frac{1}{n} \cdot (\sum P_{эксн})^2}{n-1} = \frac{27932183 - \frac{1}{7} \cdot 13908^2}{7-1} = 177467,1; \quad (8)$$

$$S^2_{ост} = \frac{\sum (P_{эксн} - P_{расч})^2}{n-2} = \frac{39977}{7-2} = 7995,4; \quad (9)$$

$$F = \frac{S_{рез}^2}{S_{ост}^2} = \frac{177467,1}{7995,4} = 22,196 > F_{(3;2;5\%)}^P = 19,164. \quad (10)$$

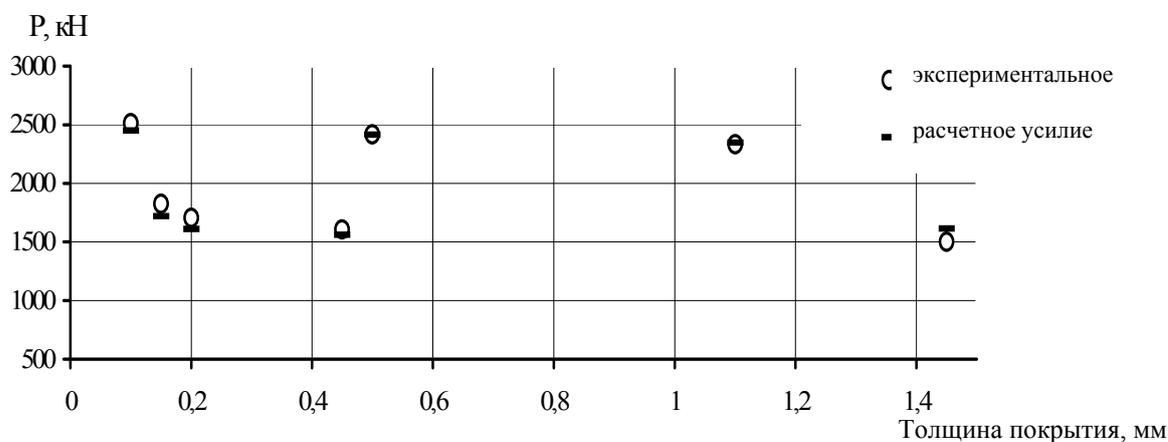


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения усилия совместной вытяжки в зависимости от толщины покрытия

Табл. 1. Оценка значимости уравнения регрессии предложенной теоретической модели с использованием F -критерия Фишера

| x | $P_{эксп}$ | $P_{эксп}^2$ | $P_{расч}$ | $P_{расч}^2$ | $P_{эксп} - P_{расч}$ | $(P_{эксп} - P_{расч})^2$ |
|----------|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 | 2514 | 6320196 | 2449 | 5997601 | 65 | 4225 |
| 2 | 1827 | 3337929 | 1720 | 2958400 | 107 | 11449 |
| 3 | 1706 | 2910436 | 1611 | 2595321 | 95 | 9025 |
| 4 | 1608 | 2585664 | 1560 | 2433600 | 48 | 2304 |
| 5 | 2417 | 5841889 | 2414 | 5827396 | 3 | 9 |
| 6 | 2333 | 5442889 | 2347 | 5508409 | -14 | 196 |
| 7 | 1503 | 2259009 | 1616 | 2611456 | -113 | 12769 |
| Σ | 13908 | 28698012 | 13717 | 27932183 | 191 | 39977 |

Для того чтобы уравнение регрессии было значимо, необходимо, чтобы оно при 5-процентном уровне значимости описывало результаты опытов в 19,164 раза лучше среднего значения параметра ($F_{(3;2;5\%)}^P = 19,164$). Полученное фактическое значение ($F = 22,196$) превышает табличное, следовательно, численное решение статистически значимо описывает результаты экспериментов.

Выводы

Построена математическая модель процесса совместной вытяжки металлической основы и металлпорошкового покрытия.

На основании экспериментальных данных и статистического анализа с использованием F -критерия Фишера подтверждена адекватность полученной математической модели.

Проведенное теоретическое исследование силовых параметров процесса совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия позволило получить пригодную

для практического применения расчетную зависимость величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Раковский, В. С.** Порошковая металлургия в машиностроении / В. С. Раковский, В. В. Саклинский. – Москва: Машиностроение. 1973. – 126с.
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б. С. Митина. – Москва: Металлургия, 1987. – 791 с.
3. **Бальшин, М. Ю.** Порошковая металлургия / М. Ю. Бальшин. – Москва: Metallurgizdat, 1948. – 332 с.
4. Способ изготовления полого композиционного изделия: пат. ВУ / М. И. Лискович, Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель. – Оpubл. 30.08.2008.
5. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 420 с.
6. **Попов, Е. А.** Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 278 с.
7. **Стрикель, Н. И.** Формирование металлопорошкового покрытия при глубокой вытяжке основы / Н. И. Стрикель, Ю. Л. Бобарикин, М. И. Лискович // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – № 4. – С. 18–22.
8. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 286 с.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Михаил Ильич Лискович, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел. +375-291-31-21-79.

Mikhail Pyich Liskovich, senior lecturer, Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: +375-291-31-21-79.

УДК 697.978

Н. В. Лобикова, С. Д. Галюзжин, О. М. Лобикова

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ УДАЛЕНИЯ КОНДЕНСАТА ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

UDC 697.978

N. V. Lobikova, S. D. Galyuzhin, O. M. Lobikova

HYDRAULIC CALCULATION OF CONDENSATE REMOVAL SYSTEM FOR THE VENTILATION UNIT

Аннотация

При удалении воздуха из помещения и прохождении его через рекуператор вентиляционной установки образуется конденсат. Во избежание переполнения поддона и разлива конденсата на поверхности вентиляционной установки необходим правильный подбор трубопровода, что позволит повысить уровень безопасности труда при эксплуатации и обслуживании данной установки. Разработан алгоритм гидравлического расчета системы удаления конденсата из вентиляционной установки, позволяющий подобрать трубопровод, соединяющий поддон для сбора конденсата с канализационной системой.

Ключевые слова:

система вентиляции, рекуператор, конденсат, энергоэффективность, безопасность.

Abstract

Condensate forms when air removed from the premises passes through the recuperator of the ventilation unit. In order to avoid tray overflow and condensate spill on the surface of the ventilation unit, the correct selection of a pipeline is necessary, which will increase the level of labor safety during operation and maintenance of this unit. An algorithm has been developed for the hydraulic calculation of the system for condensate removal from the ventilation unit, which allows selecting a pipeline connecting a condensate collection tray to the sewer system.

Keywords:

building ventilation system, recuperator, condensate, energy efficiency, safety.

Введение

Развитие успешных стратегий энергосбережения должно проводиться на всех стадиях жизненного цикла инвестиционного процесса: прединвестиционной, инвестиционной, эксплуатационной, как при новом строительстве, так при реконструкции, технической модернизации зданий, как в производственной, так и в непромышленной сферах. Требование энергетической эффективности всех систем обеспечения микроклимата помещений закреплено в проводимой государственной политике ряда стран.

На протяжении последних 25 лет в Беларуси также разрабатываются мероприятия, направленные на сокращение потребления энергоресурсов при строительстве и эксплуатации зданий.

Современные системы вентиляции классифицируют по назначению: приточные, вытяжные и приточно-вытяжные; по способу перемещения воздуха: естественные (гравитационные) или искусственные (с механическим побуждением), гибридные; по зоне обслуживания: местные или общеобменные; по конструктивному исполнению: каналные и бесканальные. Естествен-

ной вентиляции в большинстве случаев недостаточно для создания комфортного микроклимата в помещениях. В холодное время года, когда открыты окна в режиме проветривания, быстро уходит тепло из помещения, а это приводит к лишним затратам на отопление. Эффективные системы вентиляции воздуха, применяемые в производственных, общественных и жилых зданиях, должны гарантировать удаление микроорганизмов, запахов, углекислого газа, пыли, токсичных и раздражающих веществ, подачу чистого воздуха, эстетичность, небольшие габариты, компактные коммуникации. Кроме того, они должны быть экономичными и обеспечивать максимально возможную утилизацию тепла удаляемого из помещения воздуха.

При строительстве и реконструкции зданий и сооружений предусматривается установка эффективных вентиляционных систем, в которых, как правило, применяются рекуператоры, позволяющие частично утилизировать тепло удаляемого воздуха.

Рекуператор (от лат. *Recuperator* – получающий обратно, возвращающий) – теплообменник, позволяющий передавать тепло от удаляемого из помещения в окружающую среду загрязненного воздуха к приточному воздуху, поступающему из атмосферы. Рекуператоры могут различаться по схеме относительного движения приточного и удаляемого воздуха – противоточные, перекрестноточные, прямоточные и др. Конструктивно они бывают трубчатые, пластинчатые, ребристые и т. д.

Наибольшее распространение получили пластинчатые рекуператоры. Основные преимущества данной конструкции рекуператоров – сочетание невысокой по сравнению с другими типами рекуператоров цены и высокой эффективности. Однако при проектировании систем вентиляции с установленным пластинчатым рекуператором возникает ряд технических проблем. Одной из них является образование конденсата

(от лат. *Condensatus* – уплотнённый, сгущённый) – продукт конденсации парообразного состояния жидкостей, т. е. продукт перехода вещества при охлаждении из газообразной в жидкую форму. Конденсат образуется при прохождении удаляемого воздуха через рекуператор вентиляционной установки при температурах атмосферного (приточного) воздуха ниже 3...4 °С [1]. Причиной этого является охлаждение удаляемого воздуха ниже температуры точки росы. При отсутствии или несоответствии запроектированной системы удаления конденсата параметрам функционирования объекта в зимнее время происходит образование наледи в вытяжных воздуховодах снаружи помещения, а также инея на наружной поверхности рекуператора, особенно если он установлен в отдельном неотапливаемом помещении [1]. Образование инея и наледи вызывает сокращение площади живого сечения вытяжного воздуховода и, в конечном итоге, может привести к прекращению функционирования системы вентиляции. Поэтому вентиляционная установка должна быть снабжена системой сбора и удаления конденсата. Наиболее эффективным способом удаления конденсата является сброс его в канализацию самотеком, т. к. при этом не требуется дополнительных затрат энергии на привод откачивающего насоса.

Расход конденсата зависит от состояния (температуры и относительной влажности) удаляемого из помещения воздуха, а также от его подачи и степени охлаждения на выходе рекуператора [1]. Поэтому актуальным является создание алгоритма расчета системы удаления конденсата из вентиляционной установки, который позволит подобрать трубопровод, соединяющий поддон для сбора конденсата с канализационной системой. Правильный подбор данного трубопровода позволит в свою очередь избежать переполнения поддона и скапливания конденсата на поверхности вентиляционной установки.

Объект исследований

Основной задачей гидравлического расчета системы удаления конденсата самотеком является выбор внутреннего диаметра d сливного трубопровода. При произвольном выборе диаметра возможно возникновение следующих проблем. Если диаметр трубопровода недостаточен, то будет происходить переполнение поддона для сбора конденсата, перелив его в корпус вентиляционной установки и попадание на пол помещения (вентиляционной камеры). При избыточном диаметре трубопровода будут неоправданные финансовые затраты.

Основная часть

Для проектирования системы удаления конденсата необходимо знать количество конденсата, которое образуется за единицу времени в удаляемом воздухе при прохождении его через рекуператор, т. е. расход конденсата. В [1] установлено, что для определения массы конденсата, выделившегося при прохождении удаляемого воздуха через рекуператор, можно использовать уравнение Клапейрона, т. к. при этом обеспечивается достаточная точность для технических расчетов. Тогда зависимость для расчета массы конденсата m_k имеет вид [2]:

$$m_k = V_{\text{вх}} \varphi_{\text{вх}} \left(a_1 T_{\text{вх}}^4 + a_2 T_{\text{вх}}^3 + a_3 T_{\text{вх}}^2 + a_4 T_{\text{вх}} + a_5 \right) - \frac{p_{\text{вх}} V_{\text{вх}} T_{\text{вых}}}{T_{\text{вх}} p_{\text{вых}}} \varphi_{\text{вых}} \left(a_1 T_{\text{вых}}^4 + a_2 T_{\text{вых}}^3 + a_3 T_{\text{вых}}^2 + a_4 T_{\text{вых}} + a_5 \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{вх}}$ – объем воздуха на входе в рекуператор, м³; $\varphi_{\text{вх}}$, $\varphi_{\text{вых}}$ – относительная влажность удаляемого воздуха на входе в рекуператор и на выходе из него; $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$ – абсолютная температура удаляемого воздуха на входе в рекуператор и на выходе из него соответственно, К; $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$ – абсолютное давление воздуха на входе в рекуператор и на выходе из него соответственно, Па; a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 – коэффициенты уравнения ре-

грессии, позволяющего аналитическим путем определить массу конденсата в воздухе в состоянии насыщения, $a_1 = 0,102 \cdot 10^5$; $a_2 = 0,956 \cdot 10^3$; $a_3 = 0,336$; $a_4 = 52,559$; $a_5 = 3093,081$.

Для определения объемного расхода конденсата Q_k , м³/с, подставим вместо $V_{\text{вх}}$ расход воздуха $Q_{\text{вх}}$, м³/с, поступающего на вход рекуператора, и разделим уравнение (1) на плотность воды ρ_v , кг/м³, т. е.

$$Q_k = \frac{Q_{\text{вх}}}{\rho_v} \left[\varphi_{\text{вх}} \left(a_1 T_{\text{вх}}^4 + a_2 T_{\text{вх}}^3 + a_3 T_{\text{вх}}^2 + a_4 T_{\text{вх}} + a_5 \right) - \frac{p_{\text{вх}} T_{\text{вых}}}{T_{\text{вх}} p_{\text{вых}}} \varphi_{\text{вых}} \left(a_1 T_{\text{вых}}^4 + a_2 T_{\text{вых}}^3 + a_3 T_{\text{вых}}^2 + a_4 T_{\text{вых}} + a_5 \right) \right]. \quad (2)$$

Как известно, конденсат выделяется, когда удаляемый воздух становится пересыщенным, а относительная влажность при этом $\varphi_{\text{вых}} = 1$. Поэтому при расчете Q_k необходимо принять $\varphi_{\text{вых}} = 1$. Если в результате расче-

тов $Q_k \leq 0$, то это означает, что образование конденсата не происходит. Следует отметить, что в зимнее время для Беларуси и России при удалении воздуха из помещения и прохождении его через рекуператор всегда образуется кон-

денсат. Исключение составляют специальные помещения, где относительная влажность воздуха составляет всего несколько процентов.

Относительная влажность $\phi_{вх}$ и температура $T_{вх}$ определяются в соответствии с нормативными документами, регламентирующими параметры микроклимата помещений [3–5]. К ним относятся ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ *Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны*, СанПиН–2013 *Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях* и Гигиенический норматив *Показатели микроклимата производственных и офисных помещений*. Давление на входе в рекуператор $p_{вх}$ равно аэродинамическому сопротивлению пневмолинии от входа в рекуператор до выхода в атмосферу. Давление $p_{вых} = p_{вх} - \Delta p_{рк}$ ($\Delta p_{рк}$ – потери дав-

ления в рекуператоре, Па). Температура $T_{вых}$ определяется в соответствии с технической документацией на рекуператор, причем принимается ее минимально возможное значение для данной климатической зоны, т. к. при этом выделяется наибольший объем конденсата. Расход удаляемого воздуха $Q_{вх}$ принимается в соответствии с технической документацией на вентиляционную установку. Плотность воды с достаточной точностью для технических расчетов при давлениях до 10 МПа в диапазоне температур от 0 до 20 °С (максимально возможный диапазон температуры конденсата) можно принять $\rho_в = 10^3 \text{ кг/м}^3$ [6, с. 7].

Для выполнения гидравлического расчета необходимо знать величину напора H , который зависит от расположения вентиляционной установки относительно канализационной трубы (рис. 1).

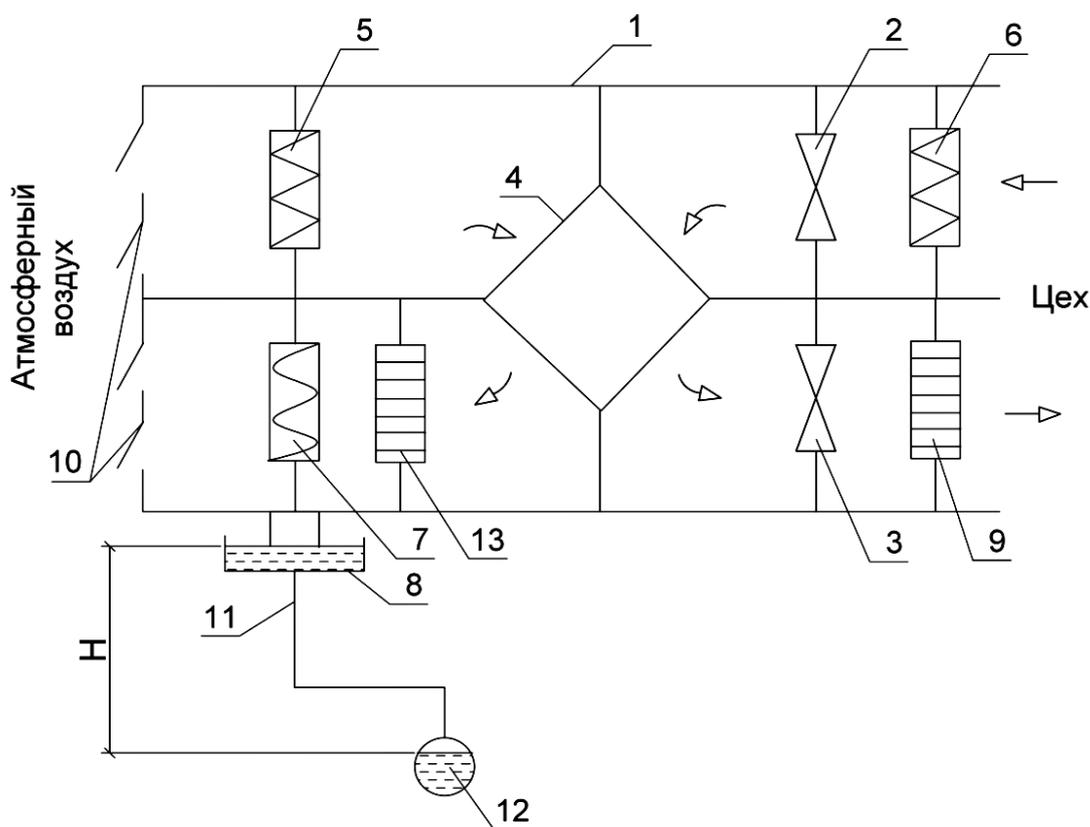


Рис. 1. Схема вентиляционной установки с системой удаления конденсата: 1 – корпус установки; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – приточный вентилятор; 4 – рекуператор; 5, 6 – фильтры; 7 – каплеуловитель; 8 – поддон для сбора конденсата; 9 – нагреватель; 10 – жалюзи; 11 – дренажный трубопровод; 12 – канализационный трубопровод

Напор H при движении конденсата по трубопроводу 11 расходуется на преодоление местных и линейных гидравлических сопротивлений [7, с. 106]:

$$H = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta + 1 \right) \frac{U_{\kappa}^2}{2g}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений; U_{κ} – средняя скорость течения конденсата в трубопроводе, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Решим уравнение (3) относительно d :

$$d = \frac{\lambda l U_{\kappa}^2}{2gH - (\Sigma \zeta + 1)U_{\kappa}^2}. \quad (4)$$

С учетом того, что $U_{\kappa} = 4Q_{\kappa}/\pi d^2$, уравнение (4) примет вид:

$$d = \frac{8\lambda l Q_{\kappa}^2}{\pi^2 g d^4 H - 8(\Sigma \zeta + 1)Q_{\kappa}^2}. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5):

$$\pi^2 g H d^5 - 8(\Sigma \zeta + 1)Q_{\kappa}^2 d - 8\lambda l Q_{\kappa}^2 = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение имеет два неизвестных: d и λ . Рассмотрим методику определения величин, входящих в уравнение (6). Величина напора H и длина трубопровода l определяются конструктивно в соответствии с расположением вентиляционной установки относительно канализационного трубопровода. Сумма коэффициентов местных сопротивлений $\Sigma \zeta$ определяется по справочнику, например [8, с. 203–232]. Коэффициент гидравлического трения λ в общем случае зависит от числа Рей-

нольдса Re и относительной шероховатости трубы Δ_{ε}/d (Δ_{ε} – абсолютная величина эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости, мм). Величина Δ_{ε} зависит от вида и материала трубы и определяется по [8, с. 200]. В этой связи решить уравнение (6) относительно d в явном виде не представляется возможным. Поэтому используем метод последовательных приближений.

Вначале конструктивно задаемся диаметром d_1 . В зависимости от конструкции трубопровода 11 (см. рис. 1) определяем H и l , а по [8] – $\Sigma \zeta$ и Δ_{ε} . С помощью уравнения (2) рассчитываем Q_{κ} . Затем для расчета λ определяем число Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{4Q_{\kappa}}{\pi d_1 \nu}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость воды.

Кинематическая вязкость воды определяется по справочнику в зависимости от ее температуры [6, с. 14]. В качестве температуры воды можно принять T_{ex} .

При $Re < 2300$ имеет место область ламинарного течения: *область I*. В этой области λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется следующей зависимостью [8, с. 199]:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (8)$$

Область II наблюдается при переходе от ламинарного течения к турбулентному: $Re = 2300 \dots 4000$. В этой области λ также зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Н. Френкеля [7, с. 83]:

$$\lambda = \frac{2,7}{Re^{0,53}}. \quad (9)$$

Область III – область гидравлически гладких труб (режим течения турбулентный) имеет место

при $Re = 4000 \dots 20d_1/\Delta_3$. В этой области λ также зависит только от числа Рейнольдса и не зависит от шероховатости стенок трубы.

Для определения λ в этой области при $Re < 10^5$ можно пользоваться формулой Блазиуса [6, с. 67]:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (10)$$

При $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$ целесообразно использовать формулу Коэнкова [6, с. 69]:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}. \quad (11)$$

В области IV докватричного сопротивления ($Re = 20 d_1/\Delta_3 \dots 500 d_1/\Delta_3$) λ зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубы Δ_3/d_1 . Для определения λ в этой области наиболее часто используют формулу А. Д. Альтшуля [6, с. 69]:

$$\lambda = 0,11(\Delta_3 / d_1 + 68 / Re)^{0,25}. \quad (12)$$

Область квадратичного сопротивления (область V) наблюдается при $Re > 500 d_1/\Delta_3$. В этой области λ зависит только от относительной шероховатости стенок трубы Δ_3/d_1 . Для определения λ в этой области часто используют формулу Прандтля – Никурадзе [6, с. 72]:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,2 \lg \frac{3,7d_1}{\Delta_3}\right)^2}, \quad (13)$$

а также формулу Шифринсона [6, с. 72]:

$$\lambda = 0,11(\Delta_3 / d_1)^{0,25}. \quad (14)$$

Затем с помощью уравнения, полученного из уравнения (6), определяем H_1 :

$$H_1 = \frac{8Q_k^2(\Sigma \zeta d_1 + \lambda l)}{\pi^2 g d_1^5}. \quad (15)$$

Сравниваем H_1 с H . Если $H_1 > H$, то это означает, что выбранный d_1 недостаточен и для протекания воды с расходом Q_k для исключения переполнения поддона 8 (см. рис. 1) необходим трубопровод большего диаметра. При $H_1 > H$ диаметр трубопровода необходимо уменьшить. По результатам данного сравнения принимаем новое значение диаметра трубопровода d_2 , повторяем расчет, определяем H_2 и сравниваем его с H . Если разница между H_2 и H не превышает 5 %, то результат можно считать удовлетворительным для технических расчетов. Когда разница между H_2 и H превышает 5 %, то необходимо расчет продолжить до достижения требуемой разницы в 5 %. Затем из сортамента труб необходимо выбрать трубу с ближайшим большим диаметром. Схема алгоритма расчета d приведена на рис. 2.

Заключение

Разработан алгоритм гидравлического расчета системы удаления конденсата из вентиляционной установки, позволяющий в конечном итоге подобрать трубопровод, соединяющий поддон для сбора конденсата с канализационной системой. Правильный подбор данного трубопровода позволяет избежать переполнения поддона и разлива конденсата на поверхности установки вентиляционной установки, что повышает уровень безопасности труда при эксплуатации и обслуживании данной установки.

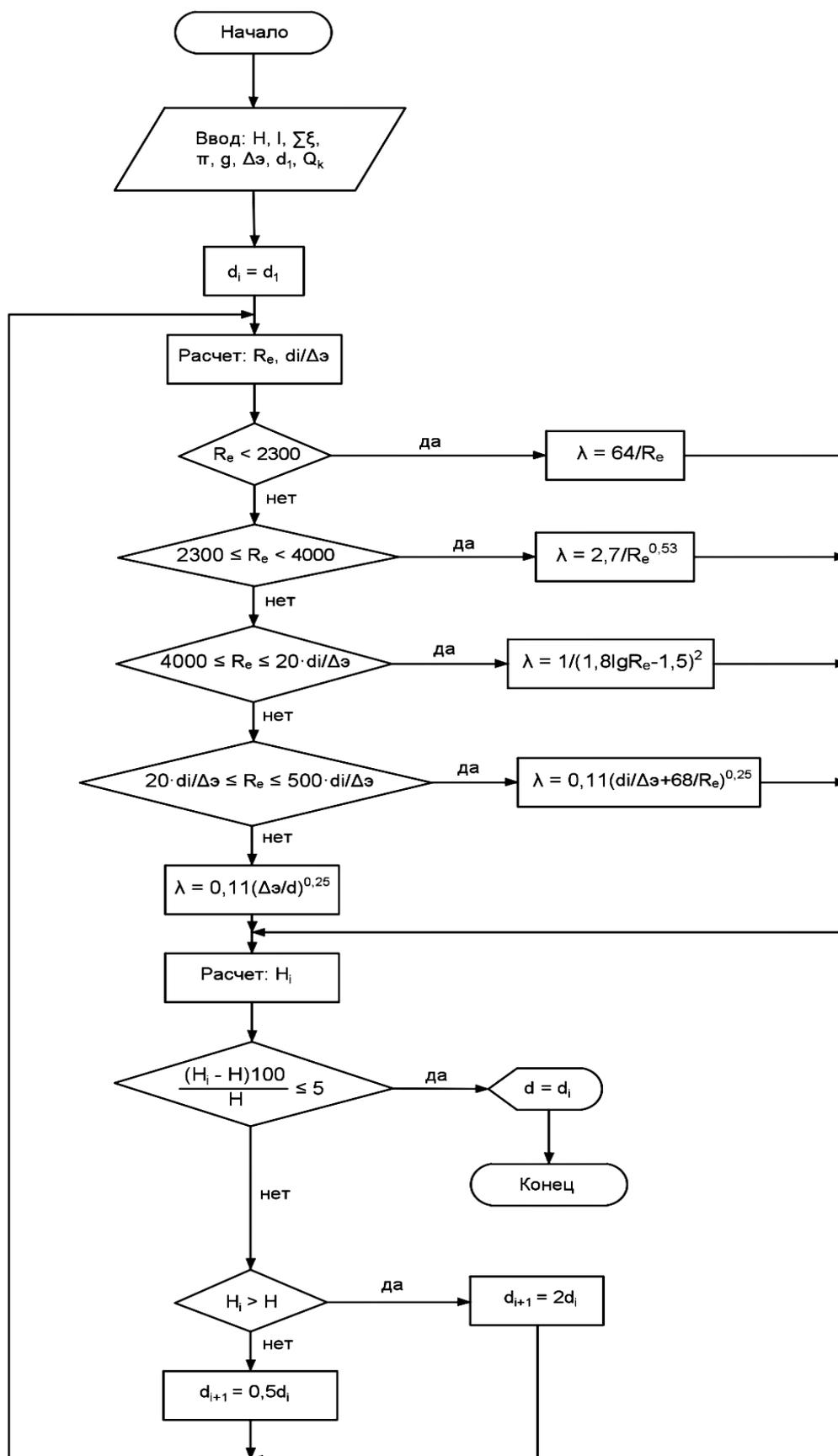


Рис. 2. Схема алгоритма гидравлического расчета системы удаления конденсата из вентиляционной установки

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галюжин, С. Д.** Определение исходных данных для проектирования устройства удаления конденсата из рекуператора вентиляционной установки / С. Д. Галюжин, Н. В. Лобикова, О. М. Лобикова // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 7. – С. 63–71.
2. **Галюжин, А. С.** Определение объема конденсата при сжатии воздуха с помощью уравнений Клапейрона и Ван-дер-Ваальса / А. С. Галюжин, С. Д. Галюжин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 110–119.
3. **ГОСТ 12.1.005–88.** ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
4. Санитарные нормы и правила. Требования к контролю воздуха рабочей зоны [Электронный ресурс]: утв. постановлением М-ва здравоохранения РБ от 11 окт. 2017 г. № 92. – Режим доступа: <http://www.ohrana-truda.by/topic/5546-utverzhdenu-novye-sanitarnye-normy-i-pravila-t/>. – Дата доступа: 10.01.2019.
5. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны: гигиенические нормативы [Электронный ресурс]: утв. постановлением М-ва здравоохранения РБ от 11 окт. 2017 г. № 92. – Режим доступа: <http://www.ohrana-truda.by/topic/5546/>. – Дата доступа: 10.01.2019.
6. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.]; под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 382 с.
7. **Юшкин, В. В.** Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / В. В. Юшкин. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 270 с.
8. **Ухин, Б. В.** Гидравлика: учебное пособие / Б. В. Ухин. – Москва: ФОРУМ, 2009. – 464 с.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Надежда Васильевна Лобикова, лаборант, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-33-628-11-92.
Сергей Данилович Галюжин, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-29-740-39-48.
Ольга Михайловна Лобикова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-33-628-11-92.

Nadezhda Vasilyevna Lobikova, laboratory assistant, Belarusian-Russian University. Phone: +375-33-628-11-92.
Sergey Danilovich Galyuzhin, Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-740-39-48.
Olga Mikhailovna Lobikova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-33-628-11-92.

УДК 621.83.06

Е. С. Лустенкова, Я. Н. Метелица, А. Н. Моисеенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОКОНИЧЕСКОГО РОЛИКОВОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ NX И MSC.ADAMS

UDC 621.83.06

E. S. Lustenkova, Y. N. Metelitsa, A. N. Moiseenko

MODELLING OF FACE-BEVEL ROLLER GEARING IN NX AND MSC.ADAMS

Аннотация

Рассмотрены вопросы проектирования и компьютерного моделирования сферических роликовых передач, обеспечивающих большие значения передаточных отношений при малых габаритах. Принцип передачи мощности основан на зацеплении роликов с плоскими зубчатыми колесами. Ролики установлены в два ряда на конических поверхностях сателлита, который совершает сферическое движение. Рассмотрены два алгоритма моделирования зубьев плоских центральных колес в системе NX: с помощью эквидистантной поверхности и методом последовательного вычитания объединенных массивов тел. Зубья плоских колес имеют равную высоту по длине, что повышает равномерность их нагружения. Приведены результаты кинематического анализа двух моделей передач в системе MSC.ADAMS, а также практической реализации результатов работы с помощью 3D-принтера.

Ключевые слова:

сферическая роликовая передача, сферический механизм, компьютерная модель, ролик, плоское зубчатое колесо.

Abstract

The article deals with the design and computer modeling of spherical roller transmissions that provide high values of transmission ratios and have small dimensions. The principle of power transmission is based on the engagement of rollers with teeth of face gears. The rollers are mounted in two rows on the conical surfaces of the satellite, which performs a spherical movement. Two algorithms for modeling the teeth of flat central gears in the NX system are considered using an equidistant surface and the method of sequential subtraction of combined arrays of bodies. The teeth of the flat wheels are of equal height in length which increases uniformity of their loading. The paper presents results of the kinematic analysis of two transmission models in the MSC.ADAMS system and the practical implementation of the research results using a 3D-printer.

Keywords:

spherical roller transmission, spherical mechanism, computer model, roller, face gear.

Введение и постановка задачи

Применение новых видов зацеплений направлено на решение как специфических инженерных задач [1], возникающих в различных отраслях промышленности, так и создание редукторных механизмов общемашиностроительного назначения, обладающих свойствами, которые не могут обеспечить другие традиционные виды зацеп-

лений. Речь идет, в частности, о механических приводах, обеспечивающих большие передаточные отношения при малых габаритах и массе. Это позволяет использовать маломоментные, высокоскоростные и относительно дешевые асинхронные двигатели. Большие значения передаточных отношений можно получить с помощью различных схем планетарных зубчатых механизмов с двухвенцовыми сателлитами за счет

подбора чисел зубьев венцов сателлита и центральных колес. К относительно новым механическим передачам относят волновые передачи, причем в качестве деформируемого элемента может выступать как гибкое зубчатое колесо, так и несвязанная цепочка тел качения, что позволяет снизить потери на скольжение [2]. Эти механизмы образуют класс передач с промежуточными телами качения (ППТК), отличающийся большим разнообразием используемых схем и конструкций [3–5]. В последнее время возрос интерес к цилиндрично-коническим зацеплениям [6] и прецессионным передачам [7], где вращательное движение ведущего вала трансформируется в сферическое движение сателлита, которое впоследствии преобразуется в замедленное вращение ведомого вала передачи. Эти зацепления позволяют разрабатывать малогабаритные редукторные узлы с большими значениями передаточных отношений, сопоставимыми с диапазоном волновых передач, и с большей уравниваемостью, чем у планетарных зубчатых передач с цилиндрическими колесами.

В исследуемых сферических роликовых передачах (СРП) [8, 9] контакт двух рядов роликов осуществляется с зубьями плоских центральных колес, которые можно рассматривать как рабочие поверхности торцовых кулачков. В отличие от передач, описываемых в [10], в СРП контактируют не два зубчатых венца, а цилиндрические ролики и зубья, образуя цевочно-циклоидальное зацепление, КПД которого выше.

Целью данной работы была разработка алгоритмов компьютерного моделирования пространственных кулачковых поверхностей, обеспечивающих стабильность мгновенного передаточного отношения и минимизацию погрешностей сопряженных профилей. Компьютерное моделирование и прототипирование позволяют снизить затраты на разработку редукторной техники и провести оптимизацию пара-

метров передач на стадии проектирования без изготовления экспериментальных образцов [11]. Для моделирования передач использовались ведущие мировые САПР и системы динамического анализа. Для моделирования применялась система Siemens NX [12], для исследования динамики – система MSC.ADAMS [13].

Модель СРП с двухрядным сателлитом и принцип работы передачи

Сферические роликовые передачи относятся к классу сферических механизмов и по структуре и кинематике аналогичны зубчатым планетарным передачам с двухрядным сателлитом. Отличие состоит в том, что сателлит СРП совершает не плоское, а сферическое движение, а именно регулярную прецессию, преобразуя кинематические и силовые параметры движения ведущего вала. Разработаны методики компьютерного моделирования [11, 14] и технологии изготовления пространственных кулачковых поверхностей с заменой сложных профилей упрощенными [15, 16]. Исследования, приводимые в данной работе, направлены на разработку алгоритмов моделирования кулачковых поверхностей, сопряженных с цилиндрическими поверхностями роликов, которые установлены на сателлите в два ряда.

Для исследования кинематики зацепления в модели передачи (рис. 1) оставлены лишь необходимые элементы. Ведущий вал содержит наклоненный участок к его оси под углом Θ (угол нутации), который реализуется с помощью эксцентрика 1. Сателлит 4 устанавливается на эксцентрик с помощью одного или пары подшипников, которые в представленной модели не показаны. Сателлит 4 содержит тела качения (ролики). В рассматриваемой модели ролики объединены с телом сателлита и представляют собой цевки или зубья цилиндрической формы.

Ролики установлены в два ряда, расположены симметрично оси сателлита. Один ряд роликов контактирует с неподвижным центральным колесом 3, а второй ряд роликов взаимодействует с

подвижным центральным колесом 2, соединенным с ведомым валом (в модели не показан). Зубья центральных колес имеют постоянную высоту по длине.

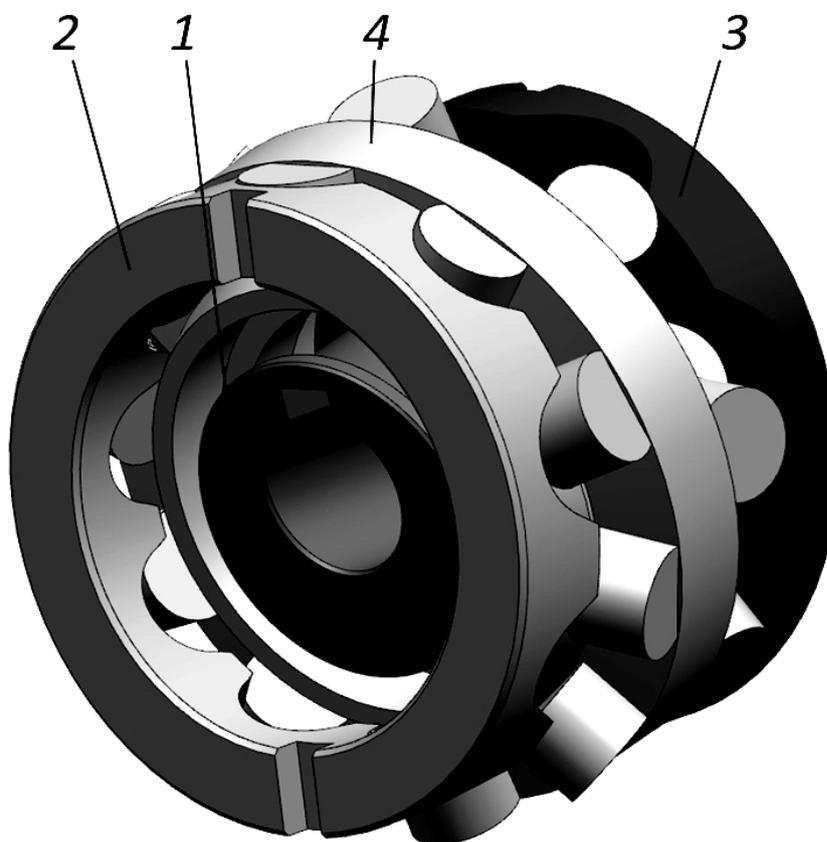


Рис. 1. Модель СРП: 1 – эксцентрик; 2 – подвижное центральное колесо; 3 – неподвижное центральное колесо; 4 – сателлит

При вращении ведущего вала вращение эксцентрика вынуждает сателлит совершать сферическое движение с постоянным углом нутации (регулярную прецессию). В модели СРП принята следующая индексация: параметры подвижного центрального колеса и взаимодействующих с ним роликов имеют индекс «2», а параметрам неподвижного центрального колеса и контактирующим с ним роликам присваивается индекс «3». Рассмотрим модель передачи со следующими параметрами: число зубьев центральных колес $Z_2 = 9$, $Z_3 = 7$. Соответственно, число роликов будет на единицу больше: $n_{s2} = 10$,

$n_{s3} = 8$. Кинематические зависимости, определяющие передаточное отношение СРП, аналогичны зубчатым передачам с двухрядным сателлитом. Передаточное отношение исследуемой СРП

$$i = \frac{(Z_3 + 1) \cdot Z_2}{Z_2 - Z_3} = \frac{n_{s3} \cdot (n_{s2} - 1)}{n_{s2} - n_{s3}} = 36. \quad (1)$$

Диапазон передаточных отношений силовых передач может варьироваться от 6 до 200 при диаметре корпуса редуктора до 250 мм для передачи моментов до 200 Н·м.

Моделирование поверхностей зубьев методом равноотстоящей поверхности

Рассмотрим основные геометрические параметры СРП. В исследуемой модели сателлит состоит из трех частей (рис. 2, а): центральной основы и двух дисков с роликами, оси которых располагаются на конических поверхностях. При этом для упрощения компьютерных вычислений ролики в модели выполнены заодно с дисками, на которых должны быть закреплены их оси.

Изначально задаются числа зубьев колес и роликов, определяющих передаточное отношение (см. формулу (1)), радиус основной сферы, являющийся максимальным радиусом R_{\max} сферической поверхности, на которой располагаются оси роликов. В рассматриваемой модели $R = R_{\max} = 30$ мм. Амплитуда многопериодной замкнутой кривой,

расположенной на этой поверхности и образованной перемещением оси ролика в процессе работы передачи, $A = 6$ мм. Эта многопериодная кривая называется центральной кривой. Угол нутизации $\Theta = A/R = 6/30$ рад. Диаметр ролика $d_s = 2 \cdot r_s = 10$ мм, расстояние $L_{k \min} = r_s + \Delta = 6$ мм (рис. 2, б). Соответственно, определяется расстояние как

$$R_{g \max} = \sqrt{R^2 - L_{k \min}^2}. \quad (2)$$

Ранее были получены параметрические уравнения координат точек центральных кривых как функции центрального угла φ : $x = f_1(\varphi)$; $y = f_2(\varphi)$; $z = f_3(\varphi)$. Угол φ изменяется от 0 до $2 \cdot \pi$. Коэффициентами в этих уравнениях являются следующие параметры: $Z_{2(3)}$, R_g , L_k и Θ .

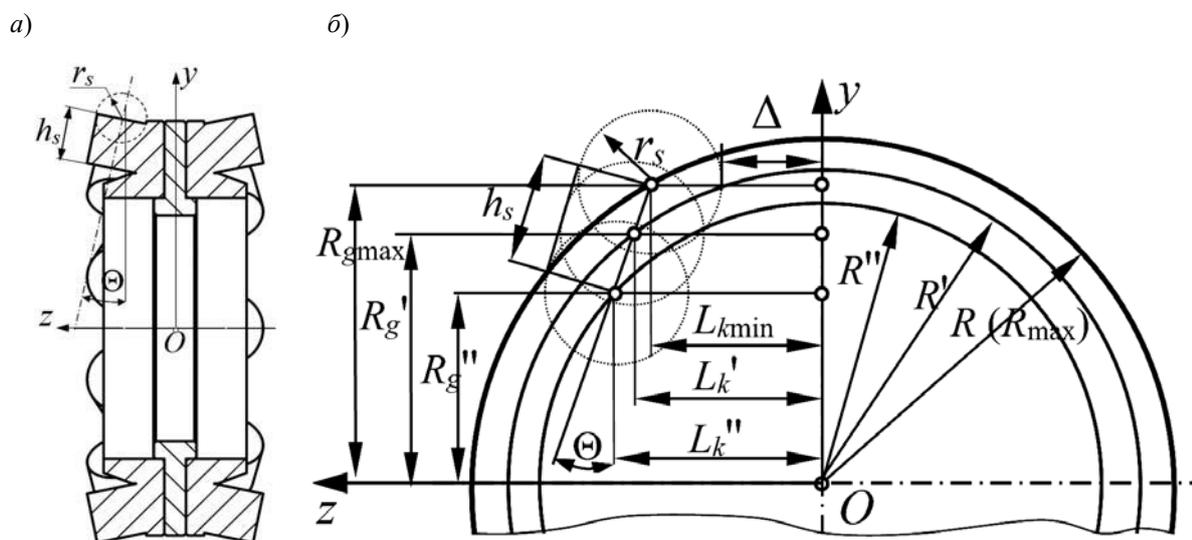


Рис. 2. Основные геометрические параметры СРП: а – сечение сателлита; б – расчетная модель

Алгоритмы моделирования предполагают, что в указанные параметрические уравнения поочередно подставляются значения $R_g = 30,0, 29,5, 29,0, 28,5, \dots, 25,0$ мм, формирующие, таким образом, массив значений R'_g, R''_g и т. д. Величина данного диапазона (30,0...25,0 мм) обу-

словлена задаваемой длиной роликов h_s .

На каждом этапе вычислялось значение параметра:

$$L_k = (R_{g \max} - R_g) \cdot \text{tg}(\Theta) + L_{k \min}. \quad (3)$$

Образовывался массив значений

L'_k , L''_k и т. д., в котором каждому R'_g соответствовало свое значение L'_k , а каждому R''_g – значение L''_k и т. д. Эти значения попарно подставлялись в параметрические уравнения центровых кривых вместо R_g , L_k соответственно. В системе NX строились центровые кривые в виде сплайнов, соединяющих точки с рассчитанными по параметрическим уравнениям координатами. Результат построения ряда кривых приведен на рис. 3, а.

Рассмотрим первый алгоритм моделирования кулачковой поверхности плоского колеса. Из ряда кривых ис-

пользовались только две (рис. 3, б): самая дальняя 1 и самая ближняя 2 к оси передачи. Далее формировалась поверхность 3, представляющая собой геометрическое место осей роликов. На заключительном этапе проводилось построение искомой кулачковой поверхности 4, эквидистантной поверхности 3. Объем лишнего материала в модели колеса удалялся из заготовки путем «вытягивания» поверхности относительно оси передачи и вычитания полученного объема. Результат моделирования показан на рис. 4.

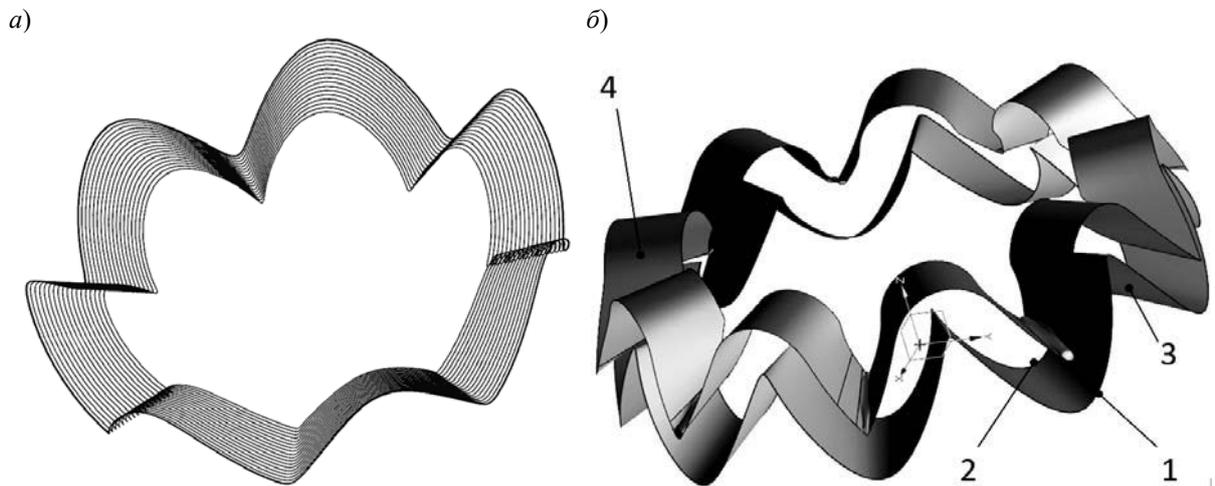


Рис. 3. Моделирование центровых кривых и поверхностей: а – совокупность центровых кривых, построенных согласно параметрическим уравнениям; б – формирование поверхности зубьев плоских колес с помощью эквидистантной поверхности

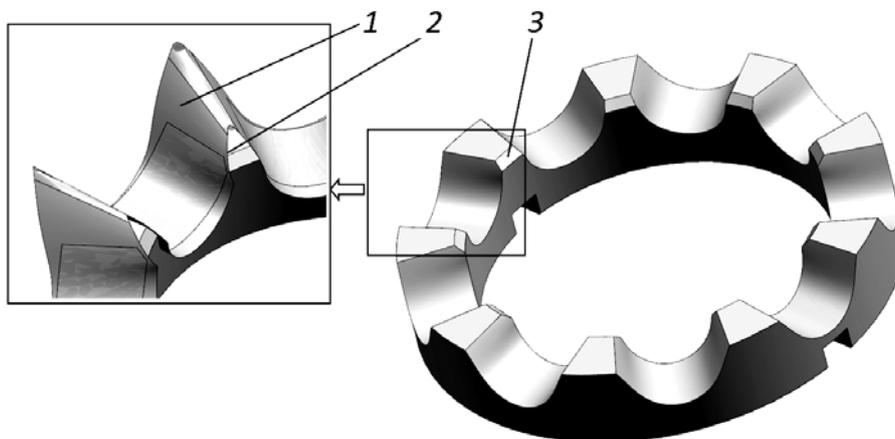


Рис. 4. Модель зубьев, образованных с помощью эквидистантной поверхности: 1 – равноудаленная эквидистантная поверхность; 2 – границы поверхности, не «покрывающей» кулачок в осевом направлении; 3 – фаска

Вышеописанный алгоритм привел к определенным погрешностям, а именно – эквидистантные кулачковые поверхности формировались не на весь торец кулачка. Были некоторые части поверхности торца «заготовки», не закрываемые эквидистантной поверхностью. Их пришлось удалять с помощью фаски (см. рис. 4), что снизило длину контактных линий. Причем это относилось только к подвижному центральному колесу. Для неподвижного центрального колеса данных погрешностей не возникло, что, очевидно, связано с меньшим числом периодов у последнего при одинаковых радиальных габаритах.

Моделирование поверхностей зубьев методом вычитания массивов объединенных тел

Для устранения вышеуказанных недостатков был применен второй вари-

ант моделирования. При этом использовались все центровые кривые, показанные на рис. 3, а. Поочередно на каждую из кривых устанавливалась сфера с радиусом, равным радиусу цилиндрического ролика r_s . Формировался массив этих сфер, равномерно распределенный вдоль центральной кривой, содержащий около 400 элементов (рис. 5, а). Массив объединялся в одно тело, полученный объем вычитался из тела заготовки. Такая операция проводилась для каждой кривой из набора. В результате была получена модель кулачка, показанная на рис. 5, б. Следует отметить, что при моделировании радиус ролика изначально принимался $r_s = 5$ мм, однако вследствие погрешностей построения в модели во избежание интерференции тел данный радиус постепенно уменьшался до полного ее отсутствия. Для первого варианта моделирования кулачков он составил 4,98 мм, для второго – 4,90 мм.

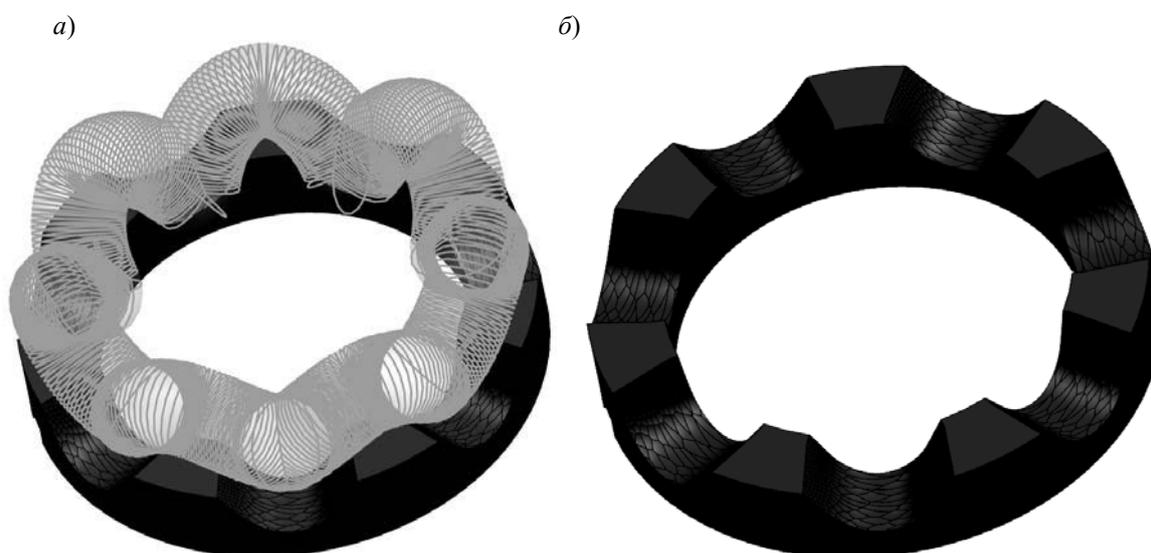


Рис. 5. Моделирование плоского колеса по второму алгоритму: а – ряд центровых кривых в модели; б – модель колеса, полученная последовательным вычитанием массивов из заготовки

Поверхность зубьев во втором случае приближена к реальной, т. к. повторяет во многом рельеф, образуемый при фрезеровании сферической фрезой. Величина «шероховатости» зависит от количества центровых кривых, т. е. от

интервала изменения R_g и от количества элементов, размещаемых вдоль центровых кривых. Их максимальное значение ограничено возможностями программы, т. к. при малом шаге координаты центров сфер становятся одинаковыми при

округлении. Тогда при создании кривой в виде сплайна возникают самопересечения и ошибки построения.

Исследование кинематики передачи и прототипирование колес

Исследования кинематических характеристик передач проводились в модуле динамического анализа программы NX «Motion» и в системе MSC.ADAMS. На рис. 6 показаны результаты исследований для двух моделей передач (см. рис. 1), отличающихся применением центральных плоских колес, полученных по двум различным алгоритмам. Все остальные параметры принимались одинаковыми для двух моделей.

В двух параметрических моделях СРП были установлены четыре шарнира: три вращательных (для эксцентрика, подвижного колеса и в паре «эксцентрик – сателлит») и один фиксированный (для неподвижного колеса). В настройках вращательного шарнира эксцентрика задавалась постоянная угловая скорость ведущего вала (эксцентрика) $n_1 = 360$ град/с. Программой отслеживалась угловая скорость ведомого вала (подвижного центрального колеса). Были заданы два 3D-контакта (между сателлитом и подвижным колесом и между сателлитом и неподвижным колесом). При этом кулоновское трение (Coulomb friction) не учитывалось, коэффициент жесткости для всех деталей принимался $10 \cdot 10^4$ Н/мм, коэффициент демпфирования был равен 10 м·с/мм.

На рис. 6 штриховыми линиями указаны теоретические значения угловой скорости n_2 ведомого вала, полученные с учетом передаточного отношения $i = 36$, определенного по формуле (1): $n_2 = n_1/i = 10$ град/с. Исследования проводились для работы передачи в течение 2 с, что соответствовало двум полным оборотам ведущего вала. Число вычислений (шагов) в обоих случаях – 1200.

При исследовании кинематики пе-

редач в системе NX установлено, что меньшую кинематическую погрешность привносит в модель первый алгоритм с построением поверхностей зубьев с помощью эквидистантной поверхности. Амплитуда колебаний угловой скорости в этом случае примерно в два раза ниже, чем при реализации второго алгоритма.

Зубчатые колеса были изготовлены согласно разработанным моделям с помощью порошкового 3D-принтера Shining Pro 250S производства KHP (рис. 7). Материал колес – нержавеющая сталь 316L (российский аналог – сталь 03X17H14M3), твердость поверхностей после спекания 170...190 НВ.

Заявленная точность изготовленной детали предполагает отклонения не более $\pm 0,01$ мм от номинальных размеров, однако очевидна необходимость последующей финишной обработки поверхностей зубьев.

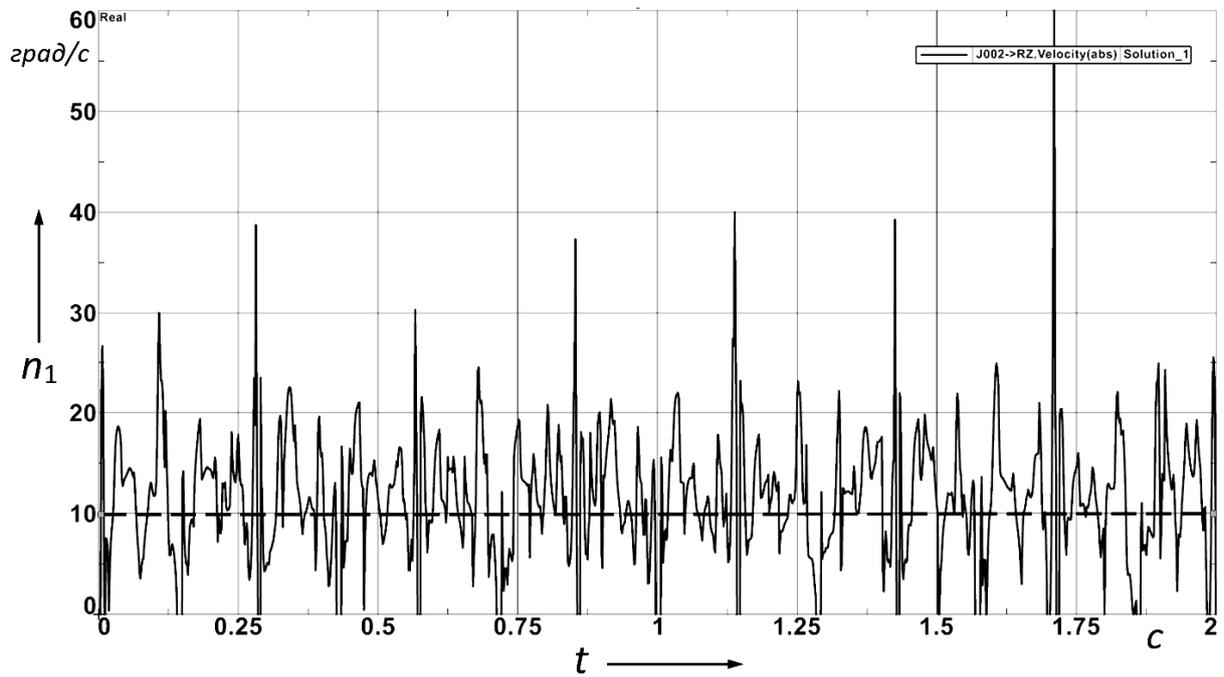
Выводы

Разработаны два алгоритма моделирования зубьев центральных колес СРП с двухрядным сателлитом. Модель передачи с зубьями, поверхности которых сформированы эквидистантной поверхностью к поверхности расположения осей роликов, показывает кинематически более точные значения угловой скорости ведомого вала. На большую погрешность мгновенного передаточного отношения ($i = n_1/n_2$) СРП, модели колес которой были созданы по второму алгоритму, безусловно, оказало существенное влияние уменьшение номинального радиуса ролика r_s , что привело к образованию существенных зазоров в зацеплении и возрастанию динамических нагрузок. Однако применение первого алгоритма ограничено возможностями системы NX формировать неразрывные поверхности, зависящие от сочетания параметров СРП. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности продолжения поиска оптимального алгоритма моделирования с

использованием объединенного массива в виде роликов, что снизит трудоем-

кость процесса и погрешности получаемого профиля.

а)



б)

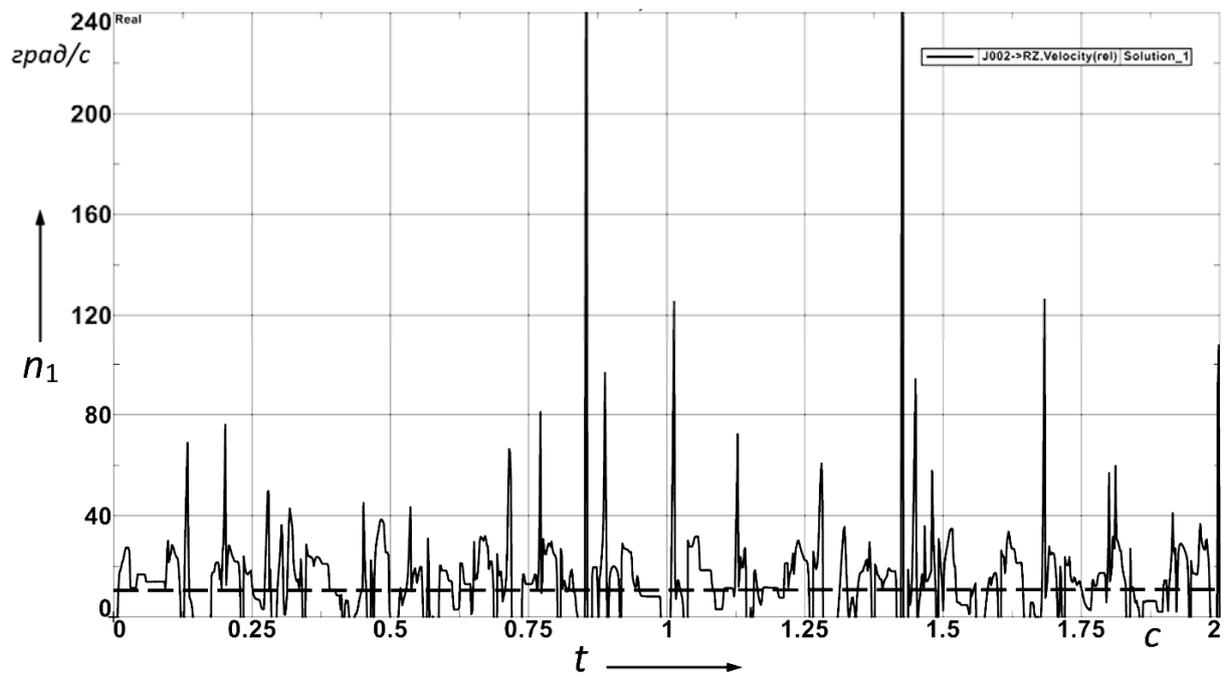


Рис. 6. Исследование кинематики СРП при использовании различных алгоритмов моделирования центральных колес: а – первый алгоритм; б – второй алгоритм

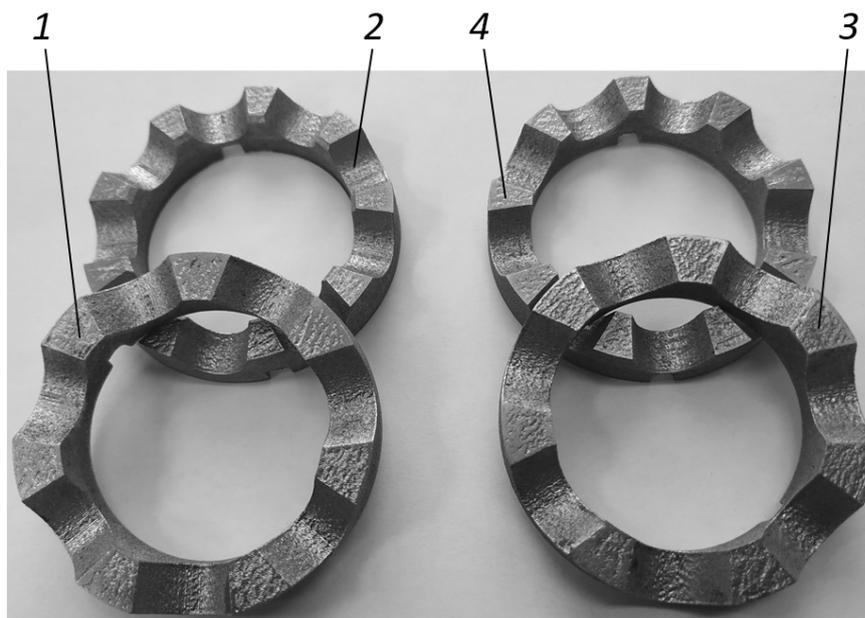


Рис. 7. Центральные зубчатые колеса, изготовленные на 3D-принтере: 1, 2 – неподвижное и подвижное колеса (первый метод); 3, 4 – неподвижное и подвижное колеса (второй метод)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.
2. **Лустенков, М. Е.** Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Изв. вузов. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 13–19.
3. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–27.
4. **Lustenkov, M. E.** Planetary Ball Transmissions: Strength Calculations / M. E. Lustenkov // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 9. – P. 862–866.
5. **Lustenkov, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / M. E. Lustenkov // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, № 2. – P. 111–121.
6. **Bostan, I.** Development of Planetary Precessional Transmission with Multicouple Gear / I. Bostan, V. Dulgheru // Power Transmissions: Proceedings of the 4th International Conference, held at Sinaia, Romania, June 20–23, 2012. – Vol. 13. – P. 597–608.
7. **Лопатин, Б. А.** Цилиндро-конические зубчатые передачи: монография / Б. А. Лопатин, О. Н. Цуканов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – 200 с.
8. **Лустенков, М. Е.** Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестник машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 25–28.
9. **Лустенков, М. Е.** Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2019. – № 5. – С. 32–43.
10. **Калашников, Д. Б.** Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач с применением метода конечных элементов / Д. Б. Калашников // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 67–69.
11. **Лустенкова, Е. С.** Сравнительный анализ сферических роликовых передач с различными профилями беговых дорожек / Е. С. Лустенкова, Я. Н. Метелица, А. Н. Моисеенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2 (63). – С. 23–33.
12. NX [Электронный ресурс]: официальный сайт компании Siemens PLM Software. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>. – Дата доступа: 05.03.2019.

13. Hexagon [Электронный ресурс]: официальный сайт компании MSC.Software. Adams. The Multi-body Dynamics Simulation Solution – Режим доступа: <https://www.mscsoftware.com/product/adams/>. – Дата доступа: 05.03.2019.

14. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: монография / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с.: ил.

15. **Лустенков, М. Е.** Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.

16. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П. Н. Громыко [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 209 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 15 марта 2020 года

Екатерина Сергеевна Лустенкова, ассистент, Белорусско-Российский университет.
E-mail: fittsova@gmail.com.

Ян Николаевич Метелица, студент, Белорусско-Российский университет.

Андрей Николаевич Моисеенко, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Ekaterina Sergeyevna Lustenkova, assistant lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: fittsova@gmail.com.

Yan Nikolaevich Metelitsa, student, Belarusian-Russian University.

Andrey Nikolaevich Moiseenko, PhD student, Belarusian-Russian University.

УДК 621.791 + 658.3

А. В. Хомченко, С. В. Болотов, А. В. Шульга

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЛАЗ СВАРЩИКА

UDC 621.791 + 658.3

A. V. Khomchenko, S. V. Bolotov, A. V. Shulga

TESTING OF PARAMETERS AND ANALYSIS OF DEVICES FOR EYE PROTECTION WHEN WELDING

Аннотация

Представлены методики и созданные установки для испытания средств индивидуальной защиты глаз сварщика. Рассмотрено устройство автоматического светофильтра сварочной маски и основные контролируемые его параметры, оказывающие влияние на здоровье работника и качество выполняемой работы сварщика. Приведены результаты анализа испытаний сварочных масок разных производителей, а также основные несоответствия, выявляемые при испытаниях.

Ключевые слова:

контроль параметров средств индивидуальной защиты глаз сварщика, световое излучение при сварке, защитные устройства, светофильтры, оптические затворы, оптические светофильтры, промежуточный слой.

Abstract

Techniques and installations created for testing personal eye protection equipment for welders are presented. The construction of an automatic filter for a welding helmet is considered, as well as its main tested parameters that affect the health of a welder and the quality of welding performed by him. Results of the test analysis of welding helmets from different manufacturers and the main inconsistencies detected during testing are presented.

Keywords:

testing of parameters of welder's eye protection devices, light radiation during welding, protective devices, optical filters, optical shutters, interlayer.

Введение

В современном мире высоких технологий любые сварочные работы вне зависимости от того, где они проводятся, связаны с целым рядом опасных факторов, к которым относятся, прежде всего, высокая интенсивность излучения сварочной дуги, брызги расплавленного металла, разного рода отравляющие соединения, возникающие в процессе работ. По статистике 41 % от общего числа травм сварщика приходится на глаза и органы дыхания [1]. Опасность для зрения представляет ультра-

фиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение электрической дуги, кроме того, излучение в видимой части спектра также имеет большую интенсивность [2]. В процессе зажигания дуги при любой освещенности рабочего места возникает резкий скачок яркости свечения зоны сварки. Поэтому при проведении сварочных работ защиту глаз обеспечивают с помощью специальной маски.

В зависимости от процесса сварки, окружающих условий и интенсивности работы сварщика к его защите предъявляются самые различные требования.

Адаптированные под конкретный технологический процесс средства индивидуальной защиты определяют безопасность проводимых работ. Основным элементом в сварочной маске является светофильтр как с пассивным, так и автоматическим затемнением. В настоящее время сварочные маски стали удобными и безопасными, при этом современный автоматический светофильтр на маске сварщика не только защищает глаза от электромагнитного излучения, но и позволяет контролировать качество сварного шва.

Таким образом, анализ результатов испытаний характеристик свароч-

ных масок представляет определенный интерес с точки зрения их подбора при проведении различных сварочных работ, что и определяет актуальность выполненных исследований.

Автоматический светофильтр и его характеристики

Широко используемая в настоящее время фибровая маска содержит автоматический жидкокристаллический (ЖК) затвор с изменяющимся коэффициентом пропускания в зависимости от вида сварочных работ. На рис. 1, а показан внешний вид маски [3].

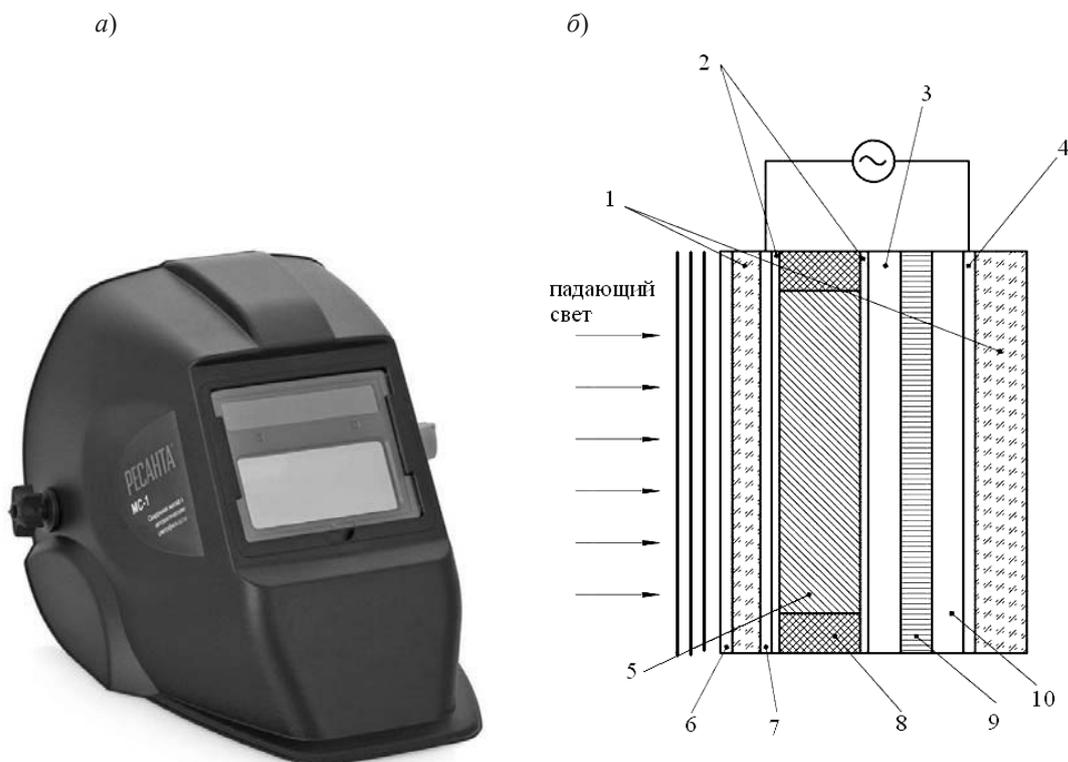


Рис. 1. Внешний вид сварочной маски (а) и конструкция автоматического светофильтра (б): 1 – подложка из стекла; 2 – изолирующий слой; 3 – диэлектрическое зеркало; 4, 7 – прозрачный электрод; 5 – слой ЖК; 6 – интерференционный фильтр; 8 – уплотнитель; 9 – поляризатор; 10 – фоторезистор

Автоматический светофильтр (см. рис. 1, б) состоит из защитного экрана, изготовленного из поликарбоната толщиной 1,2 мм, защищающего оптическую поверхность от механических

воздействий; многослойных ультрафиолетового и инфракрасного светофильтров; двух или трех последовательно расположенных ЖК-ячеек, обеспечивающих переход светофильтра из про-

зрачного в непрозрачное состояние с необходимым коэффициентом пропускания в видимой области спектра для применяемого режима сварки; экрана из поликарбоната, защищающего внутреннюю поверхность светофильтра [4]. Например, оптическая система светофильтра сварочной маски, состоящей из двух жидкокристаллических ячеек, в состав которых входят четыре стеклянные подложки, четыре проводящих слоя ($\text{In}_2\text{O}_3: \text{Sn}$) и три поляризационные пленки, обеспечивает пропускание света в ультрафиолетовой области спектра $\sim 7 \cdot 10^{-3} \%$, а в инфракрасной области – $\sim 2 \%$. В ИК-диапазоне спектра содержится основная доля излучения дуги сварки, поэтому для его ослабления применяются не поглощающие фильтры, а ИК-отражательные фильтры на основе многослойных интерференционных тон-

копленочных структур, которые, как правило, состоят из чередующихся слоев металла (Ag) и проводящих окислов (SnO_2 или In_2O_3) на подложке из оптического стекла марки СЗС 21. Для получения интерференционных фильтров с коэффициентом отражения 90...95 % число пар слоев может варьироваться в диапазоне от 8 до 12 [2].

Известно, что для надежной защиты глаз от светового импульса сварочной дуги необходимо обеспечить определенную скорость изменения оптической плотности фильтра во времени, соответствующую быстродействию $\sim 1...2$ мс, для современных ЖК-светофильтров время срабатывания составляет менее 0,1 мс. При этом стоит отметить, что время срабатывания и степень затемнения светофильтра связаны обратной зависимостью (рис. 2) [4].

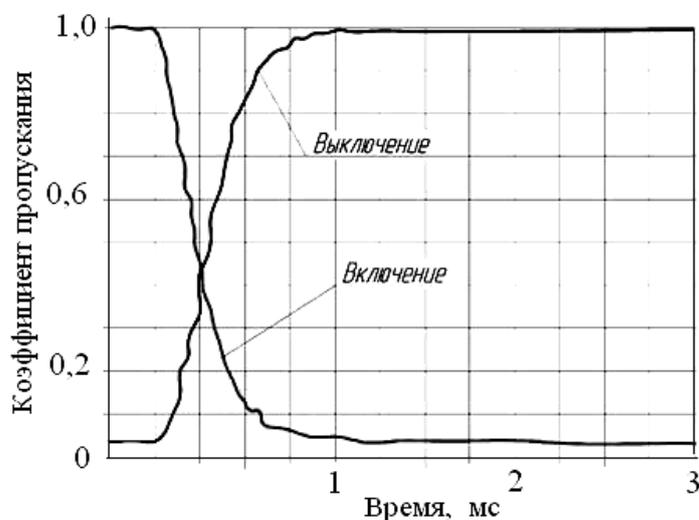


Рис. 2. Взаимосвязь времени срабатывания фильтра и степени его затемнения

Маски с автоматическими светофильтрами производят на целом ряде предприятий Франции, Японии, Германии, Швеции, Швейцарии, КНР, России и Беларуси. Основными производителями таких масок в Европе является шведская фирма ESAB и швейцарская OPTREL, на белорусском рынке среди

разных производителей (ADF, Shtenli, Wurh, Eland, Deca, Sacit, Grandvision, Most, Tecmen, Solaris, Lionking, Darc, Optech, «Ресанта», «Исток») чаще всего можно встретить маски от производителей из КНР. Поэтому при выборе маски следует обратить внимание на ее оптические свойства, т. к. именно они обес-

печивают безопасность работы и качество технологического процесса. Схема маркировки светофильтра обычно приводится на его обратной стороне. Типичный пример такой маркировки имеет вид: 4/9–13 X 1/2/3/2, где отмечено, что это устройство с одним осветленным состоянием 4 и ручной установкой затемненного состояния в одном диапазоне 9–13, далее обычно следует буквенная маркировка изготовителя. За обозначением оптического класса, как установлено в [6, п. 5.3], указывается класс по светорассеянию, класс неравномерности светового коэффициента пропускания и класс угловой зависимости светового коэффициента пропускания, разделенные косой чертой, в приведенном примере – 1/2/3/2. При выборе маски существенное значение имеет первая цифра, определяющая оптический класс светофильтра, который определяет оптическую рефракцию и астигматизм используемого фильтра. Конечно, лучше выбрать фильтр с четырьмя единицами, несмотря на то, что это напрямую влияет на стоимость маски, но зато сохранит вам зрение. Следует отметить, что сварочные маски с оптическим светофильтром третьего класса не рекомендуются для постоянной работы.

Важным параметром для обеспечения надежной защиты глаз является скорость срабатывания автоматического фильтра, которая определяется временем перехода ЖК-ячейки из осветленного состояния в затемненное и должна быть не более 50 мкс. Стоит отметить также, что плавная регулировка чувствительности обеспечивает комфортный режим работы во время сварочного процесса, т. к. слишком чувствительный светофильтр реагирует на блики морганием, а светофильтр с низкой чувствительностью может не отреагировать на появление электрической дуги. Кроме того, во многих масках предусмотрены два режима работы: шлифовка и затемнение. В первом слу-

чае фильтр не затемняется, что позволяет производить абразивную резку и чистку металла, а во втором – в зависимости от величины тока происходит затемнение светофильтра [7].

Такие параметры автоматического светофильтра, оказывающие влияние на здоровье работника и качество выполняемой работы сварщика, как неоднородность светопропускания, спектральная ширина полосы пропускания в видимой области спектра, а также рефракция и астигматизм могут быть использованы при принятии решения о выборе поставщика средств индивидуальной защиты глаз.

Контроль параметров средств индивидуальной защиты глаз сварщика

Для контроля параметров средств индивидуальной защиты глаз сварщика при испытаниях на соответствие требованиям [6] использовались измерительные установки, принципиальные схемы которых приведены в [8], но при этом их практическая реализация была оригинальной.

При испытании светофильтров средств индивидуальной защиты глаз сварщика на сферическую рефракцию и астигматизм использована установка, принципиальная оптическая схема которой приведена на рис. 3.

В качестве источника излучения использована лампа накаливания, цветовая температура нити которых составляла (2856 ± 50) К, и светофильтр с максимальным коэффициентом пропускания в зеленой области спектра с рабочей длиной волны 546 нм, а в качестве средства измерения – зрительную трубу гониометра ГС-5. Окуляр зрительной трубы имеет сетку. Тест-объект представляет собой черную пластину с вырезанной зеркальной формой, форма которой приведена на рис. 3, б. Для калибровки установки использовались калибровочные линзы с положительной и отрица-

тельной рефракцией.

Проводя настройку установки, получив резкое изображение сетки в окуляре зрительной трубы путем ее фокусировки, получаем изображение тест-объекта с хорошим разрешением. Это положение принималось за нулевую точку фокусирующей шкалы зрительной трубы, а калибровка установки проводилась путем поочередной установки калибровочных линз на место испытуе-

мого светофильтра. Смещая окуляр зрительной трубы относительно ее фокусирующей шкалы, получаем резкое изображение тест-объекта, при этом каждой калибровочной линзе соответствует определенное взаимное расположение окуляра и сетки. По результатам калибровки можно построить калибровочную кривую (рис. 4), точность калибровки составляла $\pm 0,01$ дптр.

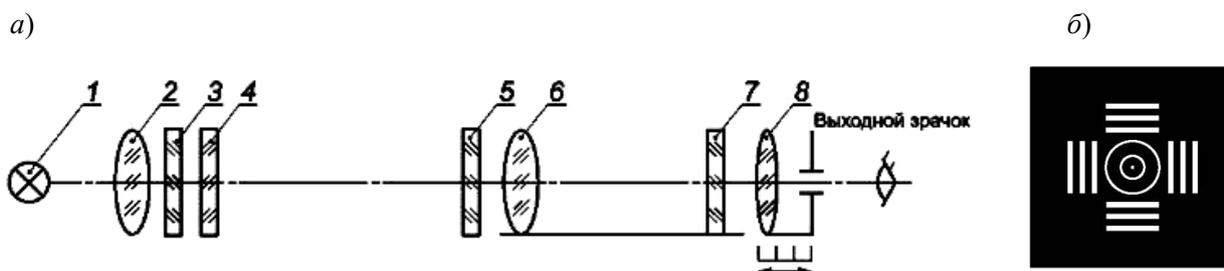


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема установки для измерения сферической рефракции (а) (1 – лампа накаливания; 2 – конденсатор; 3 – светофильтр; 4 – тест-объект с зеркалом; 5 – испытуемый светофильтр; 6 – объектив зрительной трубы; 7 – сетка; 8 – окуляр зрительной трубы) и тест-объект с зеркалом (б)

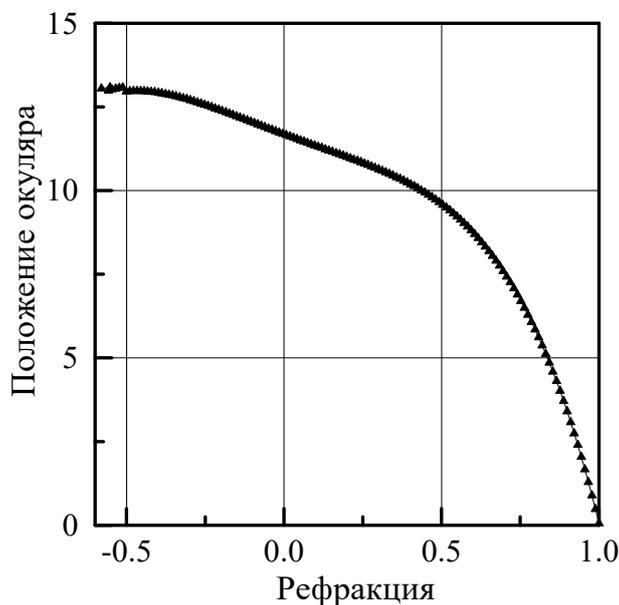


Рис. 4. Результаты калибровки установки для измерения сферической рефракции

При контроле параметров светофильтра зрительная труба фокусируется до получения четкого изображения тест-объекта, при котором и снимаются

по шкале зрительной трубы значения рефракции, последующая обработка полученных данных позволяет определить сферическую рефракцию и астигматизм

светофильтра, а также оценить разность призматического действия. Точные измерения разности призматического действия выполнялись на установке, приведенной на рис. 5.

Время переключения автоматических светофильтров измерялось по стандартной методике на установке, схема которой приведена на рис. 6.



Рис. 5. Внешний вид установки для измерения разности призматического действия светофильтра

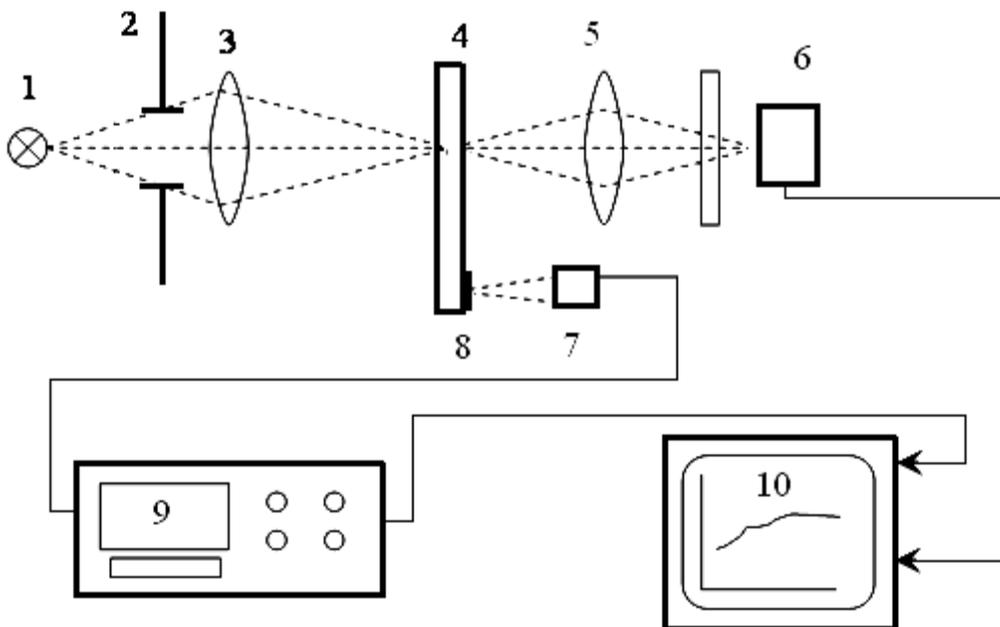


Рис. 6. Принципиальная схема установки для измерения времени переключения автоматических светофильтров

При проведении измерений свет от лампы накаливания 1, проходя через диафрагму 2, систему линз 3, автоматический сварочный светофильтр при нормальном падении попадает на фотоприемник 6, выход которого соединен с осциллографом 10. Прямоугольный импульс излучения со светодиода 7 направляется на фотоприемник 8, вмонтированный в автоматический сварочный светофильтр 4 и включает его. Синхроимпульс от задающего блока 9 и сигнал с фотоприемника 6 подаются на осциллограф 10. По измеренным уровням сигнала, поступающего с фотоприемника при пропускании света фильтром в осветленном состоянии, и сигнала, поступающего с фотоприемника при прохождении света фильтром в затемненном состоянии, определяется световой коэффициент пропускания автоматического фильтра в осветленном состоянии и минимальный световой коэффициент пропускания в затемненном состоянии. Время переключения светофильтра определяется как время, равное утроенному временному интервалу, в течение которого достигается минимальный коэффициент пропускания в затемненном состоянии.

Степень рассеяния света фильтром сварочной маски оценивалась с помощью установки, схема которой приведена на рис. 7. В качестве источника излучения используется гелий-неоновый

лазер с длиной волны излучения 632 нм, при этом диаметр пучка излучения не превышал 1 мм. Линзы 2 и 4 служат для расширения пучка излучения и направления его на геометрический центр испытуемого фильтра. Исследуемый образец 5 и приемная часть установки, включающая сменные диафрагмы 6, 7, линзу 8, фотоприемник 9, установлены на поворотном столике гониометра Г-5, позволяющем вращение относительно вертикальной оси, проходящей через оптический центр испытуемого образца. Линза 8 создает изображение на поверхности фотоприемника 9. Степень светорассеяния светофильтров оценивалась следующим образом. После установки кольцевой диафрагмы на оптической оси приемная часть установки разворачивается в горизонтальной плоскости до тех пор, пока пучок излучения лазера, прошедший через линзы, не попадал в центр кольцевой диафрагмы. Измеренный поток излучения, падающий на фотоприемник, соответствует рассеянному потоку излучения, создаваемому фильтром. Затем вводится в ход лучей круглая диафрагма и измеряется поток излучения, падающий на фотоприемник, который соответствует направленному потоку излучения, и оценивается степень рассеяния светофильтра для телесного угла, определяемого световым диаметром кольцевой диафрагмы.

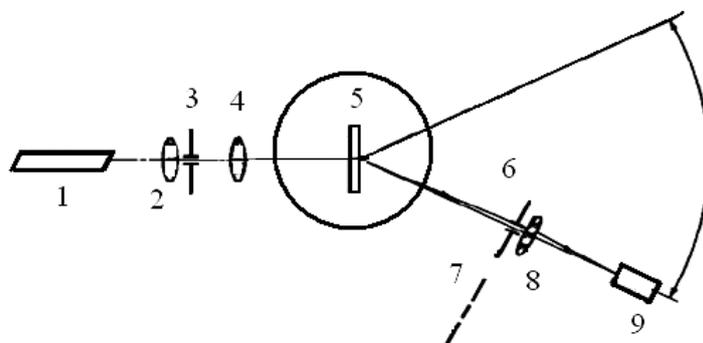


Рис. 7. Принципиальная оптическая схема установки для измерения степени светорассеяния фильтра: 1 – гелий-неоновый лазер; 2, 4, 8 – линзы; 3, 6 – диафрагмы; 5 – исследуемый светофильтр, установленный на поворотном столике; 7 – кольцевая диафрагма; 9 – фотоприемник

Измерение спектрального коэффициента пропускания T осуществлялось с помощью созданного измерительного комплекса на базе монохроматора МДР-23, а также спектрофотометра МС-122. Однородность светового коэффициента пропускания по полю смотрового окна оценивалась с помощью установки измерения отклонения светового коэффициента пропускания светофильтра сварочной маски от заданных значений в видимой области спектра. Измерение коэффициента пропускания осуществлялось с использованием фотометра с источником света типа А и приемником, спектральная чувствительность которого приведена к относительной спектральной световой

эффективности для дневного зрения. Метод измерения основан на сравнении светового потока, ослабленного исследуемым образцом, с потоком, ослабленным калибровочными мерами.

Результаты измерений и их анализ

На примере нескольких сварочных марок различных производителей выполнен анализ оптических параметров поступающих на рынок Республики Беларусь сварочных масок с автоматическими светофильтрами. В табл. 1 представлены результаты испытаний оптических параметров автоматических светофильтров двух сварочных масок одного производителя.

Табл. 1. Результаты испытаний оптических параметров автоматических светофильтров

| Модель светофильтра | Номер образца | Заявленный оптический класс | Сферическая рефракция, дптр | Астигматизм, дптр | Разность призматического действия, прдптр | |
|---------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|---|--------------------------|
| | | | | | в горизонтальной плоскости | в вертикальной плоскости |
| Z87W (Тесмен) | 0116 | 1 | 0,16 | 0,01 | 0,05 | 0,05 |
| Z87W (Тесмен) | 0117 | 1 | 0,04 | 0,06 | 0,01 | 0,01 |

Как следует из приведенных данных, параметры светофильтров масок из одной партии существенно отличаются и нередко не соответствуют заявленному. Так, образец № 0116 по величине сферической рефракции нужно отнести к третьему оптическому классу, что запрещает его использование на производстве. Образец № 0117 имел величину сферической рефракции, позволяющую отнести его к первому оптическому классу ($\leq 0,06$ дптр).

При этом, если по оптическим параметрам можно отобрать маску с оптическими параметрами, обеспечивающими отнесение ее по измеренным параметрам к более высокому оптическому классу, то спектры пропускания фильтров в видимом диапазоне практически не изменяются и имеют вид, представ-

ленный на рис. 8.

В соответствии с [9, п. Б.3.8.1] максимальная спектральная чувствительность сварочных светофильтров с автоматической установкой градиционных шифров должна находиться на длине волны (555 ± 75) нм. В данном случае спектр пропускания имеет многопиковую структуру с неопределенным положением максимума. Как мы уже отмечали выше, при изготовлении интерференционных фильтров число пар слоев варьируется в диапазоне от 8 до 12, поэтому вероятнее всего в данном случае используется минимальное число слоев и более тонкая подложка из оптического стекла марки СЗС 21 (или его аналога). Следует отметить, что маски хорошего качества имеют узкий пик в спектре пропускания (рис. 9, а).

Широкая полоса пропускания всегда сопровождалась повышенным значением рефракции, последнее можно использовать для экспресс-оценки характеристик автоматических светофильтров. При этом ширина полосы пропускания в видимой области спектра нередко служит ограничением использования масок на практике. На рис. 9, б приведены спектры пропускания двух масок. Для них максимальная спектральная чувствительность сварочных светофильтров

с автоматической установкой градационных шифров находится на длине волны 527 нм (при заданной в соответствии с [9] – (555 ± 75) нм), ширина полосы пропускания на половине максимального значения равна около 210 нм (при заданных в соответствии с [9] – 50...200 нм), при этом полоса пропускания имеет 10 максимумов вместо положенного одного. Очевидно, что такая маска не может пройти сертификацию и использоваться на производстве.

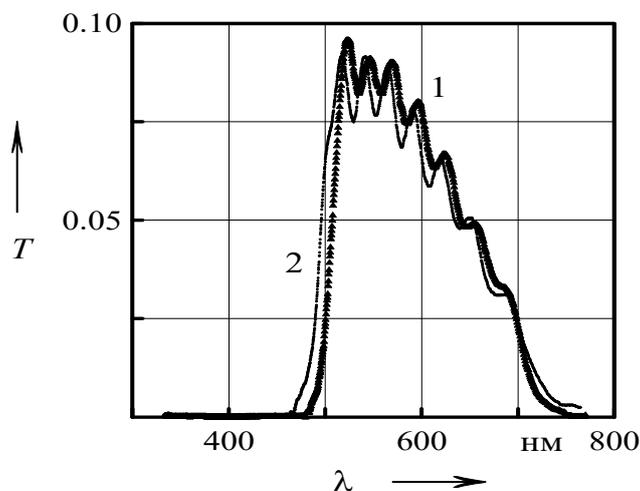
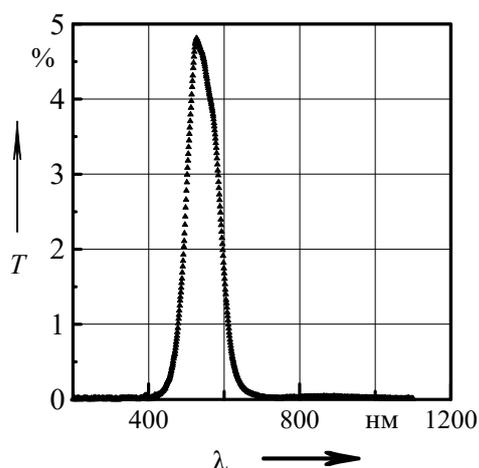


Рис. 8. Спектр пропускания масок Тестен: 1 – образец № 0116; 2 – образец № 0117

а)



б)

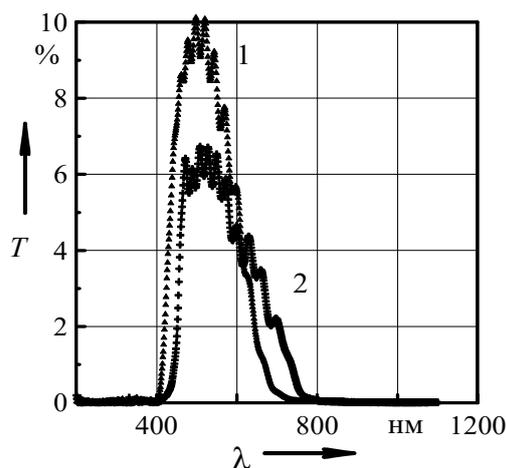


Рис. 9. Спектр пропускания маски Helmet (а) и масок SACIT (1) LY500 (2) (б)

Заявленное время срабатывания обычно в 3–10 раз меньше реально из-

меряемого; так, для образца № 0117 заявленное время срабатывания свето-

фильтра составляло 0,05 мс, а измеренное время его перевода в затемненное состояние было равно 0,3 мс.

Высокая неоднородность светопропускания (более 10 %) встречается редко и обычно не превышает 2...5 % по полю зрения. Приведенный коэффициент яркости не превышает обычно 0,1...0,3 кд/(м²·лк), что характеризует низкое светорассеяние автоматических фильтров.

Заключение

На основе анализа представленных результатов испытаний сварочных масок

разных производителей (ADF, Shtenli, Wurth, Eland, Deca, Sacit, Grandvision, Most, Tecmen, Solaris, Lionking, Darc, Ortech, «Ресанта», «Исток» и др.) обнаружены основные несоответствия, выявляемые при следующих испытаниях: завышенное время срабатывания автоматического светофильтра, неоднородность светопропускания, широкая полоса пропускания в видимой области спектра, высокая рефракция и астигматизм. Приведенные данные могут быть использованы при принятии решения о выборе поставщика средств индивидуальной защиты глаз на предприятии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слобожанина, Е. А. Анализ средств индивидуальной защиты сварщика / Е. А. Слобожанина, Е. В. Слобожанин // Экология. Риск. Безопасность: материалы IV Общерос. науч.-практ. конф. – Курган: Курганская гос. с.-х. академия, 2016. – С. 99–100.
2. Самарин, А. Маска сварщика с автоматическим ЖК-затвором / А. Самарин // Электроника. Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – № 2. – С. 48–51.
3. Тесты сварочных масок «Хамелеон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mytooling.ru/instrumenty/testy-svarochnyh-masok-hameleon>. – Дата доступа: 10.01.2020.
4. Воздействие яркого светового излучения на органы зрения и анализ методов защиты от него / О. В. Кирикова [и др.] // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Сер. Технические науки. – 2016. – № 3 (24). – С. 24–32.
5. Автоматический затемняющий фильтр с автоматическим управлением питания: пат. РФ 2385 699. – Опубл. 10.04.2010.
6. ГОСТ Р 12.4.230.1–2007. Средства индивидуальной защиты глаз. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 31 с.
7. Уголок сварщика. Чудо-кепка для сварщика // Сварка и Диагностика. – 2016. – № 1. – С. 34.
8. ГОСТ Р 12.4.230.2–2007. Средства индивидуальной защиты глаз. Методы испытаний оптических и неоптических параметров. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 92 с.
9. ГОСТ Р 12.4.238–2007. Средства индивидуальной защиты глаз и лица при сварке и аналогичных процессах. Общие технические условия. Приложение Б.3.8: Требования к спектральной чувствительности сварочных светофильтров с автоматической установкой градационных шифров. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 80 с.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года

Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: avkh@mogilev.by.

Сергей Владимирович Болотов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: physic@bru.by.

Александр Васильевич Шульга, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: avkh@mogilev.by.

Alexander Vasilyevich Khomchenko, DSc (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: avkh@mogilev.by.

Sergei Vladimirovich Bolotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: physic@bru.by.

Alexander Vasilyevich Shulga, PhD (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: avkh@mogilev.by.

УДК 621.9

Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

UDC 621.9

D. G. Shaturov, V. K. Sheleg

RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED ON THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF TURNING WITH A CEMENTED CARBIDE TOOL

Аннотация

Приведена методика определения триботехнических характеристик процесса точения с учетом изменения скорости резания и температуры в зоне резания. Получены зависимости, позволяющие определить скорость резания при переходе от абразивно-адгезионного вида износа к абразивно-окислительному.

Ключевые слова:

обработка, резец, стойкость, скорость резания, период стойкости.

Abstract

The technique for determining tribotechnical characteristics of the turning process is given, which takes into account changes in cutting speed and temperature in the cutting zone. Dependencies have been obtained that make it possible to determine the cutting speed during the transition from an abrasive-adhesive type of wear to an abrasive-oxidative one.

Keywords:

processing, cutter, durability, cutting speed, durability period.

При проектировании технологического процесса лезвийной обработки поверхностей первостепенная задача состоит в обеспечении их качества, под которой понимается, прежде всего, точность получения заданных чертежом размеров и необходимая величина шероховатости обрабатываемой поверхности при наименьших производственных затратах. Все эти требования зависят от режимов резания и износостойкости участка режущей кромки (РК) или лезвия, формообразующих обрабатываемую поверхность. Изменение размеров формообразующего участка РК в большей степени зависит от температуры в зоне резания, величина которой влияет

на триботехнические характеристики изнашиваемых поверхностей. Триботехнические характеристики можно оценить таким параметром, как ресурс работы инструмента, равный произведению скорости резания на период его стойкости, показывающий максимальный путь резания в метрах до его затупления [1, 2]:

$$L = VT_0, \quad (1)$$

где V – скорость резания, м/мин; T_0 – период стойкости инструмента, мин.

Чем больше ресурс работы инструмента, тем меньше скорость его изнашивания, тем более точно можно из-

готовить деталь, тем меньше переналадок резца на размер, тем больше будет производительность.

При обработке углеродистых конструкционных сталей можно установить несколько зон или участков по скорости резания, отличающихся между собой видами износа поверхностей инструмента. Всего таких четыре зоны (рис. 1). *Первая зона* – это зона скоростей резания до V_{n3} механического износа поверхностей инструмента, при которой отсутствует нарост на передней его поверхности. *Вторая зона* – это зона от скорости резания V_{n3} до скорости V_m при наличии нароста на передней поверхности инструмента и абразивно-адгезионного вида износа его рабочих поверхностей. *Третья зона* – это зона скоростей резания от V_m до V_n , связана с абразивно-окислительным видом износа поверхностей инструмента. *Четвертая зона* – это зона диффузионного износа поверхностей инструмента, имеет место при скорости резания больше скорости

резания V_n в точке B перегиба кривой $T_0 = f(v)$.

Расположение зон и их величина по скорости резания связаны с температурой в зоне резания, которая увеличивается при увеличении скорости резания. Температура определяет физическое состояние и триботехнические характеристики в зоне контакта изнашиваемых рабочих поверхностей инструмента со сходящей стружкой и с поверхностью резания обрабатываемой детали. При увеличении скорости резания и температуры имеет место неравномерная интенсивность изнашивания рабочих поверхностей инструмента. Так, период стойкости инструмента при изменении скорости резания имеет два экстремума, расположенных на двух уровнях по стойкости и на разных скоростях резания, образованных при разных температурах в зоне резания, между которыми расположена впадина (см. рис. 1) [1, 3].

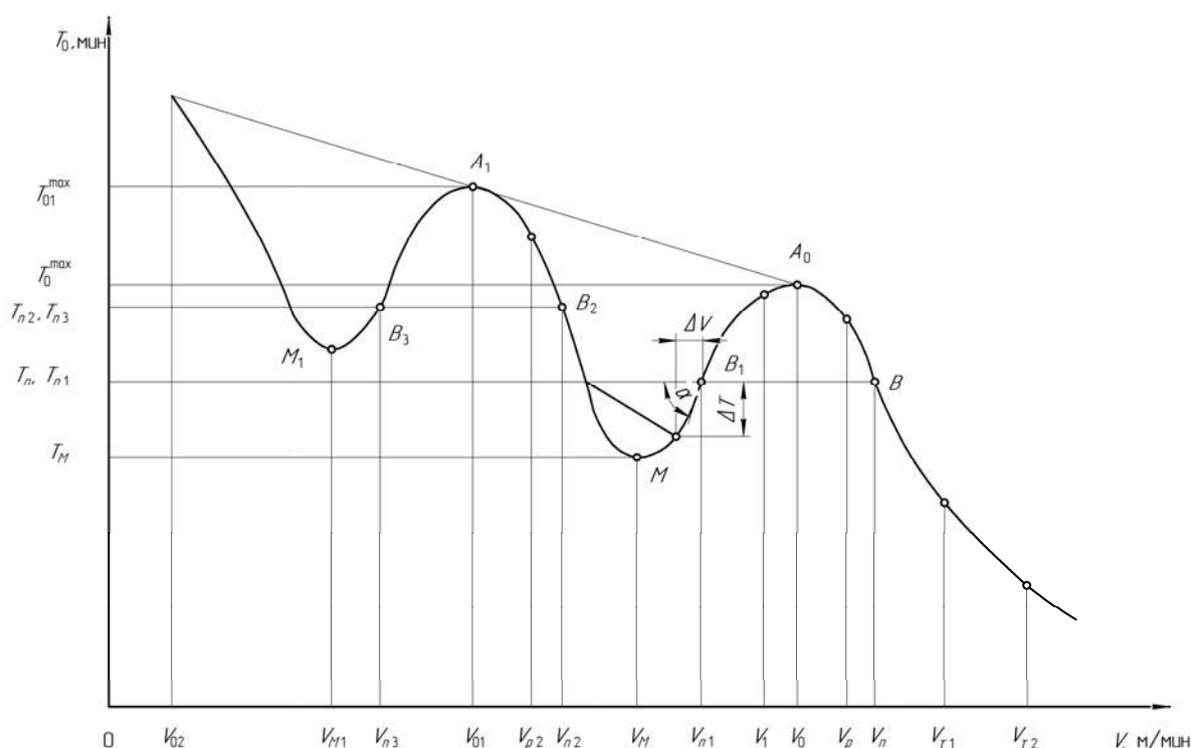


Рис. 1. Зависимость периода стойкости от скорости резания

Интервал скоростей резания впадины от скорости V_{01} до V_0 (см. рис. 1) мало изучен и совместно с другими участками скорости резания, примыкающими к нему, определяет актуальность настоящих исследований. Экстремум по периоду стойкости от скорости резания образуется, когда между рабочими поверхностями инструмента, с одной стороны, стружкой и поверхностью резания, с другой стороны, образуется промежуточное третье тело, которое защищает их от непосредственного с ними контакта. В результате стойкость инструмента увеличивается. Так, образование первого экстремума по периоду стойкости связано с явлением наростообразования на передней поверхности резца и абразивно-адгезионным видом износа его рабочих поверхностей. Максимальное значение периода стойкости зоны наростообразования имеет место в диапазоне скоростей резания от 10 до 80 м/мин в зависимости от обрабатываемого материала [5]. В диапазоне этих скоростей резания при температуре резания, равной 300 °С, на передней поверхности образуется максимальной высоты нарост, повышенной в 2,5–3 раза твердости по отношению к обрабатываемому материалу [5, 7], который выполняет функции нового резца. Период стойкости для этого диапазона скоростей резания от V_{n2} до V_m определяется из выражения [3]

$$T_{01} = \frac{T_{01}^{\max}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V-V_{01}}{V_{n2}-V_{01}} \right)^2}}, \quad (2)$$

где T_{01}^{\max} – максимальный период стойкости, мин;

$$T_{01}^{\max} = T_{n2} \sqrt{e}; \quad (3)$$

V_{n2} , T_{n2} – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, резца в точке B_2 перегиба ($n_{01} = 1,0$) кривой $T_0 = f(v)$;

V_{01} – скорость резания, м/мкм.

Второй экстремум образуется при скорости резания $V > V_m$, где V_m – скорость резания, соответствующая минимальному периоду стойкости резца впадины (см. рис.1). При скорости резания V_m и температуре резания, равной 600 °С, отсутствует нарост на передней поверхности инструмента [5, 7], а на рабочих поверхностях резца начинает образовываться от действия кислорода (воздуха) окисная пленка, защищающая их от непосредственного контакта со сходящей стружкой и поверхностью резания. Вследствие этого при увеличении скорости резания больше V_m наступает период абразивно-окислительного вида износа рабочих поверхностей инструмента, где окисление, т. е. восстановление местами разрушенной от износа пленки, является преобладающим, и стойкость резца до скорости резания V_0 увеличивается (см. рис. 1). Для этого диапазона скоростей резания, от скорости V_m до V_n , предлагается следующая зависимость для определения периода стойкости [1, 3]:

$$T_0 = \frac{T_0^{\max}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V-V_m}{V_n-V_m} \right)^2}}, \quad (4)$$

где

$$V_n = C^{1,25} \left(\frac{U_0}{1000 \delta_0 K_p} \right)^{0,25}; \quad (5)$$

$$C = \frac{C_V K_V}{t^x S^y}; \quad (6)$$

$$T_0^{\max} = T_n \sqrt{e}; \quad (7)$$

$$T_n = \frac{1000 \delta_0 K_p}{V_n U_0}; \quad (8)$$

T_0^{\max} – максимальный период стойкости, соответствующий второму экстремуму периода стойкости кривой

$T_0 = f(v)$, мин; V_n, T_n – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, инструмента в точке B перегиба кривой $T_0 = f(v)$; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; δ_0 – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм; K_p – коэффициент перевода величины линейного износа задней поверхности в радиальный (размерный), $K_p \approx \operatorname{tg} \alpha_3$ (α_3 – задний угол заточки резца); U_0 – величина относительного размерного износа лезвия резца, $U_0 = 5 \dots 7$ мкм/км при обработке стали резцом Т15К6 [6]; C_V, K_V, x, y – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [6].

Из рис. 1

$$V_0 = 0,8V_n; \quad (9)$$

$$V_{n1} = 0,6V_n; \quad (10)$$

$$V_p = 0,847V_n; \quad (11)$$

$$T_p = 1,603T_n, \quad (12)$$

где V_0 – скорость резания, соответствующая второму экстремуму периода стойкости кривой $T_0 = f(v)$, м/мин; V_p, T_p – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, максимального ресурса работы инструмента; V_{n1} – скорость резания, м/мин, соответствующая второй точке перегиба кривой $T_0 = f(v)$.

Для четвертого диапазона скоростей резания, больших V_n , предлагается следующая зависимость для определения периода стойкости [1]:

$$T_0 = T_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^5. \quad (13)$$

Для определения скоростей резания V_{01}, V_{n2}, V_m и периода стойкости T_{n2} воспользуемся результатами работы [3], в которой отмечается, что оптимальная скорость резания должна быть такой, при которой в тонком (5...10 А) кон-

тактном слое стружки с передней поверхностью резца обеспечивается кристаллизация в нем фазы аустенита. Эта оптимальная температура зависит от содержания углерода в сплаве и определяется по диаграмме «железо – углерод» из следующих зависимостей [3]:

– при $C \leq 0,8 \% C$

$$\Theta_0 \geq 911 + 120 C^2 - 326 C; \quad (14)$$

– при $C \geq 0,8 \% C$

$$\Theta_0 \geq 474 + 313 C, \quad (15)$$

где Θ_0 – оптимальная температура резания, °С; C – процентное содержание углерода в сплаве.

Тогда температуру резания при любой скорости резания можно определить, используя следующие формулы:

$$\Theta_V = \Theta_n + (\Theta_0 - \Theta_n) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{X_V}; \quad (16)$$

$$X_V = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg V_0}, \quad (17)$$

где Θ_V – температура резания при скорости резания V , °С; Θ_n – температура резания в начале обработки, $\Theta_n = 20 \dots 25$ °С; V_0 – скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента второго экстремума.

Из зависимостей (16) и (17) определяется скорость резания при заданной температуре резания [3] по формуле

$$V = V_0 \left(\frac{\Theta_V - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}. \quad (18)$$

Так, для скоростей резания V_{01} и V_m температура резания соответственно равна 300 и 600 °С [5, 7], а температуру резания для скорости V_{n2} можно предположить как среднюю температуру от

этих температур ($\Theta_{n2} = 450 \dots 460 \text{ }^\circ\text{C}$).

Тогда скорости резания определяются из следующих зависимостей [3]:

$$V_{01} = V_0 \left(\frac{300 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (19)$$

$$V_{n2} = V_0 \left(\frac{450 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (20)$$

$$V_m = V_0 \left(\frac{600 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}. \quad (21)$$

Определим скорость резания максимального ресурса работы инструмента $L_1 = VT_{01}$ зоны наростообразования. Для этого с использованием зависимостей (1) и (2) возьмем производную dL_1/dV и полученную функцию приравняем к нулю.

$$\frac{dL_1}{dV} = \frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}} \times \left[1 - \left(\frac{V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2 \left(\frac{V}{V_{01}} - 1 \right) \frac{V}{V_{01}} \right].$$

Откуда получаем уравнение

$$V^2 - V V_{01} - (V_{n2} - V_{01})^2 = 0. \quad (22)$$

После решения имеем

$$V_{p1} = \frac{1}{2} V_{01} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{V_{n2}}{V_{01}} - 1 \right)^2} \right], \quad (23)$$

где V_{p1} – скорость резания, соответствующая наибольшему ресурсу работы инструмента зоны наростообразования.

Далее произведем некоторый анализ скоростей резания впадины. Левая сторона впадины или правая ветвь кри-

вой периода стойкости $T_{01} = f(v)$ формируется при абразивно-адгезионном виде износа рабочих поверхностей инструмента. При увеличении скорости резания больше V_{n2} стойкость резца значительно уменьшается, а шероховатость обработанной поверхности увеличивается из-за отрыва твердых частиц нестабильного нароста и их перемещения на заднюю поверхность инструмента и обработанную поверхность с формированием на них углублений. Правая сторона впадины или левая ветвь кривой периода стойкости от скорости резания $T_0 = f(v)$ формируется при наличии на изнашиваемых поверхностях окисной пленки и абразивно-окислительного вида износа поверхностей инструмента. Поэтому увеличение скорости резания, большей скорости V_m , приводит к увеличению стойкости резца и уменьшению шероховатости обработанной поверхности. В силу этих причин заманчиво и целесообразно при скорости резания, большей V_{n2} , перейти на скорость резания $V > V_m$ с целью замены абразивно-адгезионного вида износа на абразивно-окислительный, где окисление, т. е. восстановление окисной пленки, является преобладающим.

Минимальная скорость резания для этого перехода определяется из соотношения $T_{01} = f(v) \geq T_n$:

$$\frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V_{\alpha 1} - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}} \geq T_n, \quad (24)$$

где $V_{\alpha 1}$ – скорость резания левой стороны впадины при стойкости T_n .

После решения зависимости (24) получим

$$V_{\alpha 1} \leq V_{01} + (V_{n2} - V_{01}) \sqrt{2 \frac{\lg(T_{n2} \sqrt{e} / T_n)}{\lg e}}. \quad (25)$$

Тогда ресурс работы инструмента при скорости $V_{\alpha 1}$ находим как

$$L_{1\alpha} = V_{\alpha 1} T_n. \quad (26)$$

Определим минимальную скорость резания V_α правой стороны впадины левого участка кривой $T_0 = f(v)$, которая при переходе от скорости $V_{\alpha 1}$ к скорости V_α обеспечит равный или больший ресурс работы инструмента по сравнению с ресурсом $L_{1\alpha}$. Скорость V_α находим из сравнения ресурсов:

$$L = V_\alpha T_\alpha \geq L_{1\alpha} = V_{\alpha 1} T_n. \quad (27)$$

Тогда из рис. 1

$$V_{\alpha 1} T_n \leq (V_{n1} - \Delta V) (T_n - \Delta T), \quad (28)$$

где

$$\Delta T = \Delta V \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 5 \frac{T_n}{V_n}.$$

После решения получим

$$\Delta V = 0,4 V_n \left(1 - \sqrt{0,25 + 1,25 \frac{V_{\alpha 1}}{V_n}} \right). \quad (29)$$

Скорость резания правой стороны впадины

$$\begin{aligned} V_\alpha &= V_{n1} - \Delta V = \\ &= 0,2 V_n \left(1 + 2 \sqrt{0,25 + 1,25 \frac{V_{\alpha 1}}{V_n}} \right). \quad (30) \end{aligned}$$

В зависимость (25) входит такой параметр, как период стойкости T_{n2} .

Предполагая симметричность расположения скоростей резания $V_{\alpha 1}$ и V_{n1} впадины относительно скорости резания V_m , можно записать

$$V_{\alpha 1} = 2V_m - V_{n1};$$

$$T_{n2} = T_n + (V_{\alpha 1} - V_{n2}) \operatorname{tg} \alpha. \quad (31)$$

После преобразования получим выражение для определения периода стойкости резца при скорости резания V_{n2} в точке B_2 перегиба кривой $T_{01} = f(v)$:

$$T_{n2} = T_n \left(1 + 5 \frac{2V_m - V_{n1} - V_{n2}}{V_n} \right). \quad (32)$$

Можно предложить и другую зависимость по определению периода стойкости

$$T_{n2} = T_m + (T_n - T_m) \frac{V_m - V_{n2}}{V_{n1} - V_m}. \quad (33)$$

Для точек B и B_2 перегиба кривых $T_0 = f(v)$ и $T_{01} = f(v)$, где интенсивность износа равномерная ($n_0 = 1$) [4], $T_n V_n U_0 = T_{n2} V_{n2} U_{01}$.

Откуда

$$U_{01} = \frac{T_n V_n U_0}{T_{n2} V_{n2}}, \quad (34)$$

где U_{01} – величина относительного размерного износа лезвия в зоне скоростей наростообразования, мкм/км.

При известности максимального периода стойкости T_0^{\max} можно определить величину температуры резания от времени обработки Θ_τ , °С, по формуле

$$\Theta_\tau = \Theta_n + (\Theta_0 - \Theta_n) \left(\frac{\tau}{T_0^{\max}} \right)^{n_1}, \quad (35)$$

где τ – время резания, мин;

$$n_1 = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg T_0^{\max}}. \quad (36)$$

Из выражения (36) легко находится время стабилизации температуры в

зоне резания и величина температуры в момент ее стабилизации:

$$\tau_{n\Theta} = T_0^{\max} n_1^{\frac{1}{1-n_1}}; \quad (37)$$

$$\Theta_{n\Theta} = (\Theta_0 - \Theta_n) n_1^{\frac{n_1}{1-n_1}}. \quad (38)$$

Для оценки триботехнических параметров процесса резания можно, используя [4], определить величины износов задней поверхности резца от времени резания для второй $T_{01} = f(v)$ и для третьей $T_0 = f(v)$ зон скоростей резания (табл. 1):

$$h_{z1} = a_{c1} \tau^{n_{01}} = \frac{\delta_0}{T_{01}^{n_{01}}} \tau^{n_{01}}; \quad (39)$$

$$h_z = a_c \tau^{n_0} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau^{n_0}; \quad (40)$$

$$n_{01} = \left[\frac{T_{01} V U_{01}}{1000 \delta_0 K_p} \right]^{1,67}; \quad (41)$$

$$n_0 = \left[\frac{T_0 V U_0}{1000 \delta_0 K_p} \right]^{1,67}. \quad (42)$$

С учетом полученных значений n_{01} и n_0 , периодов стойкости T_{01} и T_0 легко определяются [4] такие параметры процесса, как время приработки τ_{n_1} и τ_n , время установившегося износа τ_{n_1} и τ_n , величина износа задней поверхности резца δ_{n1} и δ_n , средние скорости изнашивания V_{1uz} и V_{2uz} за эти периоды и скорости V_{01uz} и V_{0uz} изнашивания за весь период стойкости инструмента для второго $T_{01} = f(v)$ и третьего $T_0 = f(v)$ диапазона скоростей резания.

В табл. 1 представлены результаты расчетов всех триботехнических пара-

метров процесса резания стали 45 резцом T15K6 на режимах $t = 1$ мм; $S = 0,24$ мм/об.

Заключение

1. Разработана общая методика определения триботехнических параметров процесса резания твердосплавным инструментом: периодов стойкости инструментов, величины износа лезвия от времени резания, ресурса работы инструментов, показателя степени n_{01} и величины относительного размерного износа U_{01} для кривой $T_{01} = f(v)$, средней температуры резания.

2. Получены зависимости для определения скоростей резания при переходе от абразивно-адгезионного к абразивно-окислительному виду износа.

Табл. 1. Триботехнические параметры процесса резания (резец Т15К6; материал сталь 45; $K_p = 0,167$; $K_v = 0,9$; $X = 0,15$; $Y = 0,2$; $C = 503$)

| | $V_{пз}$ | V_{01} | V_{11} | V_{p1} | V_{n2} | V_{a1} | $V_{ш}$ | V_a | V_{n1} | V_1 | V_0 | V_p | V_n | V_2 | V_3 |
|----------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| U_{01} | 9,2 мкм/км | | | | | | | | | | | | | | |
| | U_0 | | | | | | | | | | | | | | |
| $n_{от}$ | 0,025 | 0,87 | 1,0 | 1,22 | 1,0 | 0,614 | 0,494 | | | | | | | | |
| n_0 | | | | | | | 0,178 | 0,222 | 0,425 | 1,0 | 1,575 | 1,655 | 1,0 | 0,572 | 0,077 |
| $a_{с1}$ | 442 | 4,58 | 2,29 | 0,851 | 3,79 | 32,7 | 67,9 | | | | | | | | |
| a_c | | | | | | | 243 | 199,3 | 75,7 | 4,03 | 0,21 | 0,147 | 5,88 | 49,5 | 406 |
| $L_1, м$ | 1056 | 8800 | 9592 | 10788 | 9504 | 7140 | 6270 | | | | | | | | |
| $L_2, м$ | | | | | | | 6270 | 7144 | 10540 | 17980 | 23100 | 23800 | 17595 | 12597 | 3795 |
| $\Theta_v, ^\circ C$ | 108 | 300 | 320 | 387 | 449 | 500 | 602 | 615 | 655 | 731 | 800 | 834 | 939 | 983 | 1082 |
| $\tau_n, мин$ | 3,0 | 75,4 | 80 | 75 | 48,5 | 24 | 14 | | | | | | | | |
| $\tau_n, мин$ | 129 | 145 | 139 | 111 | 84 | 61 | 43 | 9 | 19 | 47 | 64 | 63 | 32 | 16 | 0,9 |
| $\tau_n, мин$ | | | | | | | 50 | 54 | 66 | 77 | 76 | 73 | 53 | 41 | 14 |
| $\delta_n, мкм$ | 455 | 197 | 184 | 166 | 184 | 230 | 251 | | | | | | | | |
| $\delta_n, мкм$ | | | | | | | 344 | 325 | 266 | 188 | 144 | 140 | 188 | 237 | 404 |
| $\delta_n, мкм$ | 45 | 303 | 316 | 334 | 316 | 270 | 249 | 175 | 234 | 312 | 356 | 360 | 312 | 263 | 96 |
| $V_{обс}, мкм/мин$ | 3,79 | 2,27 | 2,29 | 2,69 | 3,79 | 5,88 | 8,77 | | | | | | | | |
| $V_{обс}, мкм/мин$ | | | | | | | 8,77 | 7,94 | 5,88 | 4,03 | 3,57 | 3,68 | 5,88 | 8,77 | 33,3 |
| $V_{изб}, мкм/мин$ | 151 | 2,61 | 2,29 | 2,2 | 3,79 | 9,58 | 17,8 | | | | | | | | |
| $V_{изб}, мкм/мин$ | | | | | | | 49,3 | 35,75 | 13,84 | 4,03 | 2,27 | 2,22 | 5,88 | 15,3 | 433 |
| $V_{изб}, мкм/мин$ | 4,14 | 2,1 | 2,29 | 3,0 | 3,79 | 4,39 | 5,75 | | | | | | | | |
| $V_{изб}, мкм/мин$ | | | | | | | 3,11 | 3,22 | 3,52 | 4,03 | 4,69 | 4,97 | 5,86 | 6,27 | 7,16 |

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шелег, В. К.** Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов / В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.
2. **Шатуров, Д. Г.** Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 90–98.
3. **Шатуров, Д. Г.** Исследование режущей способности твердосплавного лезвийного инструмента при средних скоростях резания / Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 112–120.
4. **Шатуров, Д. Г.** Технологические особенности чистовой токарной обработки валов / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 192 с.
5. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 495 с.
7. **Кожевников, Д. В.** Резание металлов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
8. **Шатуров, Д. Г.** Технологические возможности управления режущей способностью лезвийного инструмента / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 112–119.

Статья сдана в редакцию 30 марта 2020 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-46-19-67.

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: Sheleh V@tut.by.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-46-19-67.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: ShelehV@tut.by.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 615.473:620.174.21

М. Г. Киселёв, С. Г. Монич, В. А. Петров, Ахмад Али

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСТАНОВКИ ШТОК-ПОРШНЯ ШПРИЦА ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕД СТАДИЕЙ ВЫДАВЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ УСИЛИЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ЕГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

UDC 615.473:620.174.21

M. G. Kiselev, S. G. Monich, V. A. Petrov, Ahmad Ali

EFFECT OF DURATION OF STOPPING A DISPOSABLE SYRINGE PLUNGER ROD BEFORE LIQUID EXTRUSION STAGE ON THE AMOUNT OF FORCE REQUIRED TO MOVE IT

Аннотация

Статья посвящена количественной оценке влияния продолжительности остановки шток-поршня шприца между стадиями всасывания жидкости и её последующего выдавливания на величину усилия, необходимого для его перемещения, а также в обосновании, на основе полученных экспериментальных данных, значения этого параметра при проведении испытания шприцев. Создано устройство, позволяющее регистрировать и измерять величину усилия, необходимого для движения шток-поршня медицинских шприцев однократного применения, а также разработана методика проведения экспериментов по оценке влияния продолжительности остановки шток-поршня между стадиями всасывания жидкости и её последующего выдавливания на значение этого усилия для двух- и трёхкомпонентного шприцев емкостью 3 мл.

Ключевые слова:

инъекционный шприц, шток-поршень, усилие движения, стадия выдавливания, стадия всасывания, устройство, методика проведения испытаний.

Abstract

The article is devoted to a quantitative assessment of the influence of duration of stopping a syringe plunger rod between the stages of liquid suction and its subsequent extrusion on the amount of force required for its movement, as well as to an experimental data-based substantiation of the value of this parameter, when testing syringes. A device has been created that detects and measures the amount of force required to move a plunger rod of disposable syringes, and a testing procedure has been developed for conducting experiments to assess the impact of duration of stopping a plunger rod between the stages of liquid suction and subsequent extrusion on the value of this force for two- and three-component 3 ml syringes.

Keywords:

injection syringe, plunger rod, travel force, extrusion stage, suction stage, device, testing procedure.

Введение

Шприцы медицинские представляют собой инструменты, используемые

для инъекций, проведения диагностических пункций или отсасывания патологического содержимого из полостей человеческого организма [1, 4]. Наиболь-

шее распространение в медицинской практике получили одноразовые шприцы (ШОП – шприц одноразового при-

менения) [5–7, 11]. Различают два основных вида одноразовых шприцев: двух- и трехкомпонентные (рис. 1).

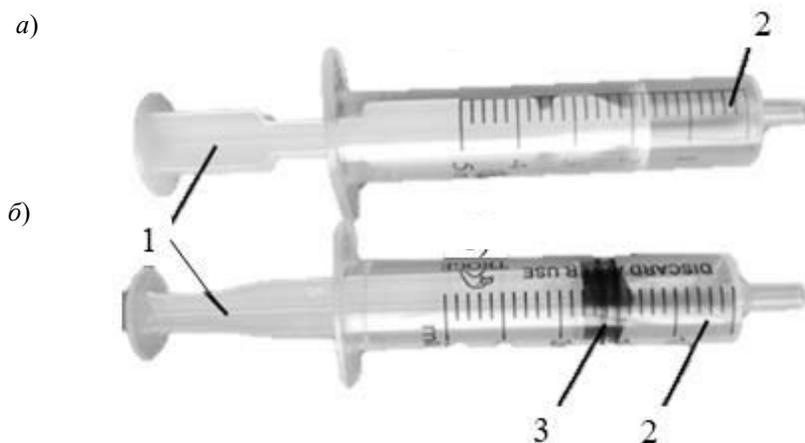


Рис. 1. Фотография общего вида двухкомпонентного (а) и трехкомпонентного (б) шприцев: 1 – шток-поршень; 2 – цилиндр; 3 – уплотнитель

Двухкомпонентные шприцы состоят из цилиндра и поршня со штоком, которые выполнены в виде одной детали. В трехкомпонентных шприцах дополнительно используется уплотнитель, который расположен на конце поршня [8–10]. Благодаря наличию этого элемента, трехкомпонентные шприцы по сравнению с двухкомпонентными характеризуются большей плавностью перемещения шток-поршня при меньшем прикладываемом к нему усилие [2, 3].

Требования, предъявляемые к медицинским шприцам однократного применения, и методы их испытаний установлены ГОСТ ISO 7886-1–2011 [6]. Одним из важных эксплуатационных показателей одноразовых шприцев является усилие, необходимое для движения шток-поршня. В [6] приведена методика проведения испытания шприцев по этому показателю. В частности, установлено, что в процессе их проведения скорость перемещения шток-поршня должна быть постоянной и составлять (100 ± 5) мм/мин. При этом по завершении стадии перемещения шток-поршня на всасывание жидкости, необходимо сделать остановку (паузу) в тече-

нии 30 с перед его перемещением на выдавливание жидкости.

Вместе с тем в литературе отсутствуют данные, которые позволяют научно обосновать численное значение продолжительности остановки шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости, нормируемое в ходе проведения испытания шприцев.

В связи с этим цель данной работы заключалась в количественной оценке влияния продолжительности остановки шток-поршня шприца между стадиями всасывания жидкости и ее последующего выдавливания на величину усилия, необходимого для его перемещения, а также в обосновании, на основе полученных экспериментальных данных, значения этого параметра при проведении испытания шприцев.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для выполнения экспериментальных исследований было создано специальное устройство, принцип работы которого поясняется схемой, представленной на рис. 2.

Цилиндр испытуемого шприца 1 устанавливается вертикально наконечником вниз в отверстие несущей планки 2 до контакта упоров с её поверхностью и посредством зажима 11 неподвижно на ней фиксируется. Упор 10 штока-поршня с помощью двух прижимных планок 3 соединяется с толкателем 9, который прикреплен к подвижной каретке 8. Последняя от электродвигателя 6 постоянного тока МН через

муфту 5 и передачу «винт – гайка» 4 получает поступательное движение вдоль вертикальной оси, перемещаясь по направляющим скользящим 7. Несущая планка 2 неподвижно соединена с тензометрическим датчиком усилия 12. На наконечник шприца устанавливается инъекционная игла диаметром 0,6 мм, конец которой помещен в стакан 14 с дистиллированной водой.

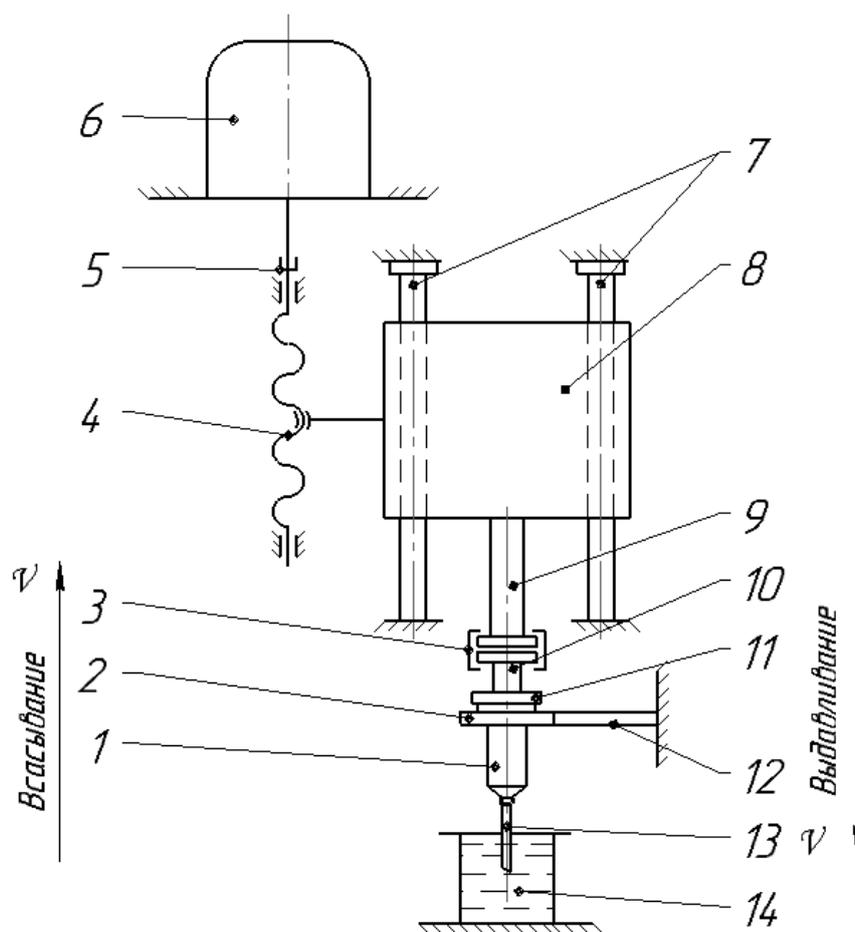


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для проведения экспериментов

При движении каретки вместе со штоком-поршнем вверх происходит стадия всасывания жидкости в цилиндр поршня, а при их движении вниз – стадия её выдавливания. Направление движения штока-поршня изменяется за счет реверсирования направления вращения вала электродвигателя, подключенного к блоку питания.

В момент окончания стадии всасывания электродвигатель отключается и по истечении определенного промежутка времени $t_{ост}$ он вновь включается для выполнения стадии выдавливания жидкости.

Возникающее между штоком-поршнем и поверхностью цилиндра усилие вызывает упругую деформацию тензо-

метрического датчика, сигнал с которого поступает на усилитель и далее на цифровой запоминающий осциллограф ALEX2102CEX. На экране последнего фиксируется изменение усилия F , необходимого для перемещения шток-поршня за время его движения относительно поверхности цилиндра шприца. Предварительно путем нагружения тензOMETрического датчика аттестованными грузами осуществляется тарировка измерительной системы, в результате которой устанавливается количественная зависимость между показаниями осциллографа и массой грузов.

Объектом испытания служили двух- и трехкомпонентные шприцы однократного применения емкостью 3 мл. Скорость перемещения шток-поршня v была постоянной и составляла 100 мм/мин. В одном случае перемещение шток-поршня происходило без остановки, а в других – с его остановкой перед стадией выдавливания жидкости продолжительностью 10, 20 и 30 с.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 3 представлена осциллограмма изменения усилия F для двухкомпонентного шприца емкостью 3 мл при различном времени остановки $t_{\text{ост}}$ движения шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: $F_{\text{вс}}$ – усилие, необходимое для движения шток-поршня на стадии всасывания жидкости; $F_{\text{выд}}$ – то же на стадии выдавливания жидкости; $F_{\text{ост}}$ – на стадии остановки движения шток-поршня.

Из сравнительного анализа приведенных осциллограмм видно, что во всех случаях с момента начала стадии всасывания жидкости (точка А) усилие F резко возрастает до точки Б, после чего остается практически постоян-

ным $F_{\text{вс}}$ до завершения этой стадии (точка В). В случае дальнейшего движения шток-поршня без остановки перед стадией выдавливания жидкости (см. рис. 3, а) усилие F изменяет знак на противоположный, резко возрастает до точки Г и далее принимает постоянное значение $F_{\text{выд}}$, которое сохраняется таким вплоть до окончания этой стадии (точка Д).

При движении шток-поршня с остановкой перед стадией выдавливания жидкости (см. рис. 3, б–г) происходит следующее. В момент остановки шток-поршня усилие F резко снижается от точки В до Г и далее принимает практически постоянное значение $F_{\text{ост}}$, которое сохраняется на протяжении всего времени $t_{\text{ост}}$. В момент начала движения шток-поршня на выдавливание жидкости (точка Д) сила F изменяет знак на противоположный и резко возрастает до точки Е, после чего принимает постоянное значение $F_{\text{выд}}$, которое сохраняется до момента окончания стадии выдавливания жидкости (точка Ж). Из сопоставления полученных осциллограмм следует, что наличие остановки шток-поршня перед выдавливанием жидкости и её длительность не влияют на характер зависимости $F(f)$. Из полученных данных также вытекает важный с практической точки зрения вывод о том, что при испытании таких шприцев в качестве нормируемых параметров оправдано использовать численные значения $F_{\text{вс}}$ и $F_{\text{выд}}$, которые имеют практически постоянную величину как на стадии всасывания жидкости, так и на стадии её выдавливания.

Для трехкомпонентного шприца емкостью 3 мл характер зависимости $F(t)$ существенно изменяется (рис. 4).

Во всех случаях при начале движения шток-поршня как на стадии всасывания жидкости, так и на стадии её выдавливания наблюдается резкий скачок усилия F , соответствующий на ос-

циллограммах $F_{вс\ max}$ и $F_{выд\ max}$. Это обусловлено переходом от трения покоя поверхности уплотнителя к трению движения по поверхности цилиндра

шприца, что, как известно [5], сопровождается скачкообразным изменением сил трения скольжения.

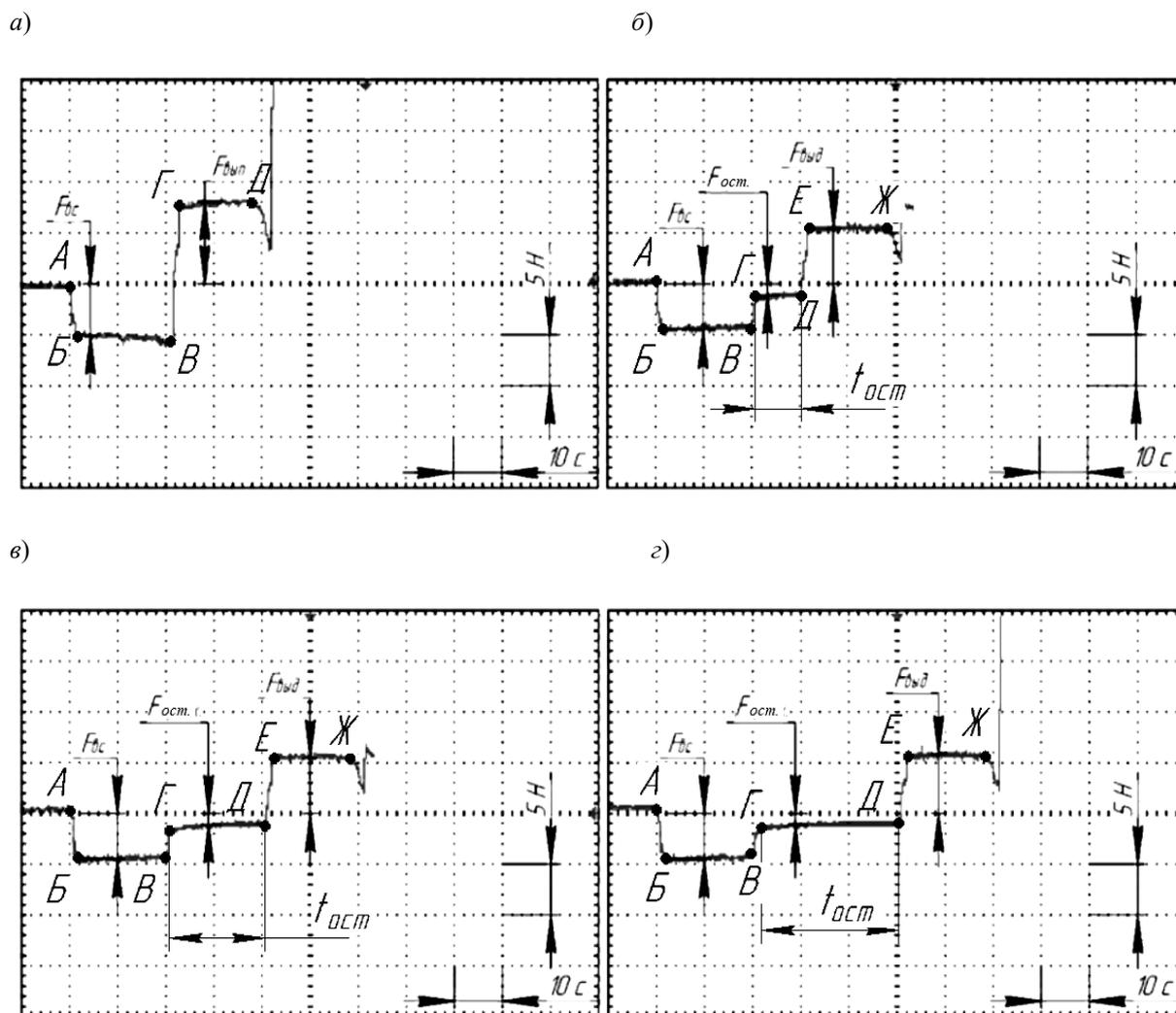


Рис. 3. Осциллограмма изменения усилия F , необходимого для перемещения шток-поршня двухкомпонентного шприца емкостью 3 мл при различном времени его остановки: а – без остановки; б – $t_{ост} = 10\ c$; в – $t_{ост} = 20\ c$; г – $t_{ост} = 30\ c$

При начале движения шток-поршня без его остановки на стадии выдавливания (см. рис. 4, а) усилие F от нулевого значения (точка А) резко возрастает до точки Б, после чего также резко несколько снижается до точки В, а затем вновь возрастает до точки Г. Далее оно постепенно увеличивается до точки Д, которой соответствует уси-

лие $F_{вс}$. При последующем движении шток-поршня на выдавливание жидкости усилие F изменяет знак на противоположный и резко возрастает до точки Е, затем несколько снижается до точки Ж, после чего плавно уменьшается до окончания стадии выдавливания жидкости (точка З), в конце которой принимает значение $F_{выд}$.

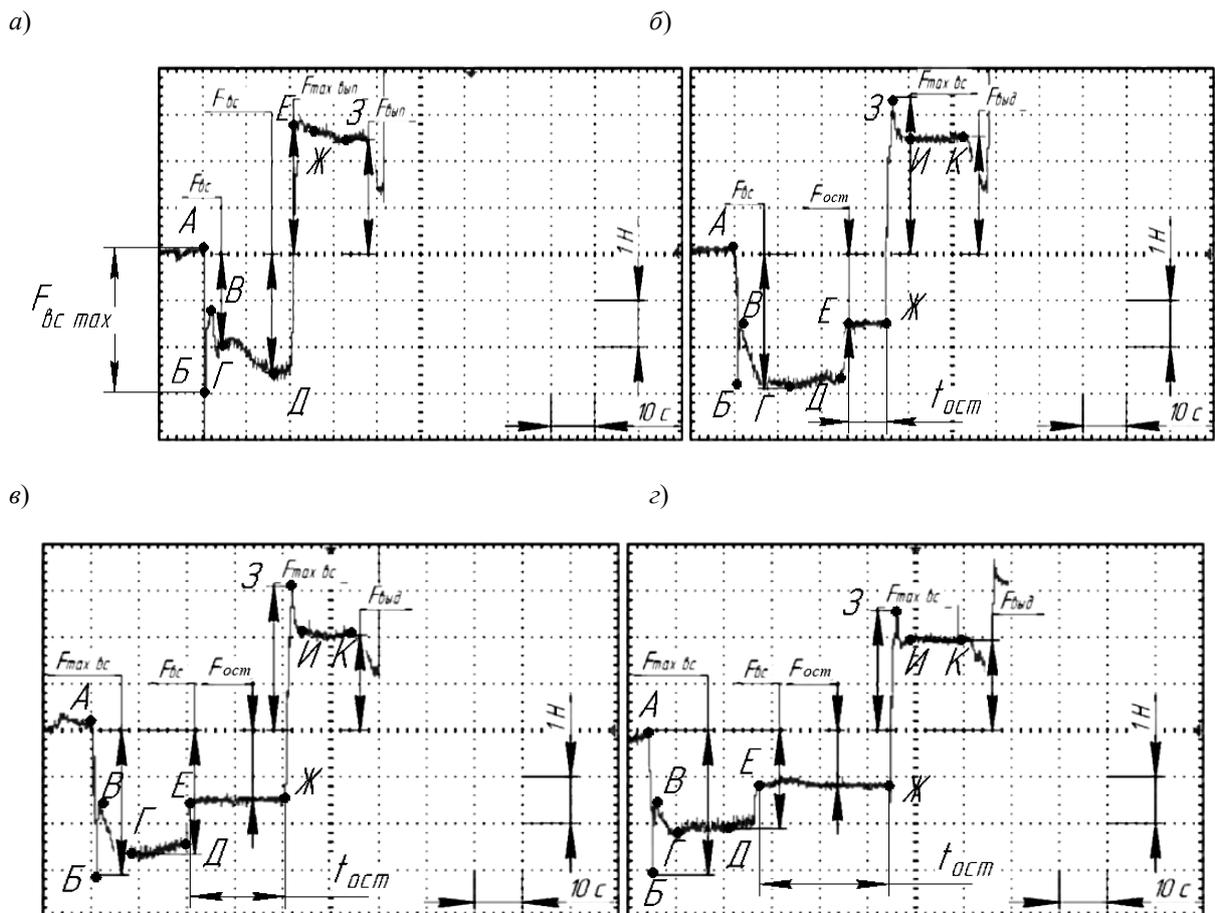


Рис. 4. Осциллограммы изменения усилия F , необходимого для перемещения шток-поршня трехкомпонентного шприца емкостью 3 мл при различном времени его остановки: a – без остановки; $б$ – $t_{ост} = 10$ с; $в$ – $t_{ост} = 20$ с; $г$ – $t_{ост} = 30$ с

При движении шток-поршня с остановками перед стадией выдавливания жидкости (см. рис. 4, б–г) изменение усилия F на стадии всасывания жидкости имеет практически такой же характер, как в выше рассмотренном случае. Различие состоит в том, что после остановки шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости усилие F снижается от точки Д до Е и далее принимает постоянное значение $F_{ост}$ на участке ЕЖ. В начале стадии выдавливания, т. е. при начальном движении шток-поршня, усилие F изменяет знак на противоположный и резко возрастает до точки З, которой соответствует значение $F_{выд\ max}$. После этого усилие F несколько снижается до точки И и далее остается практически постоянным

вплоть до завершения стадии выдавливания жидкости (участок ИК). Из сопоставления осциллограмм изменения $F(t)$ при различной продолжительности остановки $t_{ост}$ шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости следует, что наиболее стабильные во времени значения $F_{вс}$ и $F_{выд}$ наблюдаются при $t_{ост} = 30$ с.

В результате расшифровки полученных осциллограмм определены численные значения усилия, необходимого для движения шток-поршня двух- и трехкомпонентного шприцев емкостью 3 мл при различной продолжительности его остановки перед стадией выдавливания жидкости, которые приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения усилия, необходимого для движения шток-поршня двух- и трехкомпонентного шприцев емкостью 3 мл при различной продолжительности его остановки перед стадией выдавливания жидкости

| Вид шприца | Продолжительность остановки шток-поршня $t_{ост}$, с | Значение усилия F , необходимого для перемещения шток-поршня на различных стадиях его движения | | | | |
|------------------|---|--|--------------|---------------|--------------------|---------------|
| | | $F_{вс\ max}$, Н | $F_{вс}$, Н | $F_{ост}$, Н | $F_{выд\ max}$, Н | $F_{выд}$, Н |
| Двухкомпонентный | Без остановки | | 5 | – | | 8 |
| | 10 | | 4,5 | 1 | | 5,5 |
| | 20 | | 4,5 | 1 | | 5,5 |
| | 30 | | 4,5 | 1 | | 6,0 |
| Трехкомпонентный | Без остановки | 2,6 | 2 | – | 2,8 | 2,5 |
| | 10 | | 2,95 | 1,5 | 3,4 | 2,5 |
| | 20 | 3,1 | 2,7 | 1,5 | 3,1 | 2,0 |
| | 30 | 3,1 | 2,1 | 1,2 | 2,55 | 1,9 |

Из обобщенного анализа приведенных данных следует отметить следующее. Во всех случаях величина усилия $F_{вс}$ и $F_{выд}$, необходимого для перемещения шток-поршня трехкомпонентного шприца, существенно меньше, чем у двухкомпонентного. При этом перемещение шток-поршня последнего не сопровождается скачкообразным изменением усилия F при переходе от стадии покоя к стадии движения, что характерно для трехкомпонентного шприца. Следовательно, усилие, необходимое для перемещения шток-поршня двухкомпонентного шприца, в принципе характеризуется двумя стабильными во времени значениями: $F_{вс}$ и $F_{выд}$, которые и следует нормировать при испытаниях таких шприцев. При этом продолжительность остановки шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости должна составлять порядка 10...20 с. Для трехкомпонентного шприца, перемещение шток-поршня которого сопровождается скачкообразным изменением усилия при начале его движения на стадиях всасывания жидкости и её последующего выдавливания, следует использовать нормируемые значения четырех параметров: $F_{вс\ max}$, $F_{выд\ max}$, $F_{вс}$ и $F_{выд}$. При этом продолжительность

остановки шток-поршня должна составлять 30 с, при которой указанные усилия имеют практически постоянные значения.

Выводы

1. Создано устройство, позволяющее регистрировать и измерять величину усилия, необходимого для движения шток-поршня медицинских шприцев однократного применения, а также разработана методика проведения экспериментов по оценке влияния продолжительности остановки шток-поршня между стадиями всасывания жидкости и её последующего выдавливания на значение этого усилия для двух- и трёхкомпонентного шприцев емкостью 3 мл.

2. Получены экспериментальные данные, отражающие влияние наличия остановки шток-поршня испытуемых шприцев и её продолжительности на характер изменения величины усилия, необходимого для его перемещения как на стадии всасывания жидкости (воды), так и на последующей стадии ее выдавливания.

3. На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных установлено следующее:

– в начале движения шток-поршня двухкомпонентного шприца на стадии всасывания жидкости усилие F , необходимое для его перемещения, резко возрастает от нуля до значения $F_{вс}$, после чего остается практически постоянным вплоть до окончания этой стадии. При начале его движения на стадии выдавливания жидкости как с предварительной его остановкой, так и без нее усилие F изменяет знак на противоположный, резко возрастая до значения $F_{выд}$, которое остается постоянным вплоть до окончания этой стадии. Наличие остановки шток-поршня продолжительностью 10...20 с обеспечивает более стабильные, чем при её отсутствии, во времени значения усилий $F_{вс}$ и $F_{выд}$;

– в начале движения шток-поршня трехкомпонентного шприца как на стадии всасывания жидкости, так и на стадии её выдавливания имеет место скачкообразное изменение усилия F от нуля до максимальных значений $F_{вс \max}$ и $F_{выд \max}$, после чего оно также резко снижается с последующим возрастанием на стадии всасывания и снижением на стадии выдавливания жидкости, принимая далее практически постоян-

ные значения $F_{вс}$ и $F_{выд}$. Наиболее стабильные во времени значения усилий $F_{вс \max}$, $F_{выд \max}$, $F_{вс}$ и $F_{выд}$ наблюдаются при выполнении остановки шток-поршня перед стадией выдавливания жидкости продолжительностью 30 с.

4. На основе установленных зависимостей изменения усилия, необходимого для перемещения шток-поршня шприцев однократного применения, обоснованы рекомендации по нормированию этого параметра в ходе проведения соответствующих испытаний. Так, для двухкомпонентного шприца в качестве нормируемых параметров следует использовать численные значения $F_{вс}$ и $F_{выд}$, а при проведении испытания осуществлять перед стадией выдавливания жидкости остановку шток-поршня длительностью 10...20 с. При испытании трехкомпонентного шприца в качестве нормируемых параметров следует использовать численные значения $F_{вс \max}$, $F_{выд \max}$, $F_{вс}$ и $F_{выд}$, а перед стадией выдавливания жидкости осуществлять остановку шток-поршня продолжительностью 30 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабатов, Ю. Ф. Шприцы / Ю. Ф. Кабатов. – 3-е изд. – Москва: Советская энциклопедия, 1978. – Т. 27.
2. От птичьего пера до компьютерного шприца / С. А. Рабинович [и др.] // Клиническая стоматология. – 2001. – № 2.
3. Сабитов, В. Х. Медицинские инструменты / В. Х. Сабитов. – Москва: Медицина, 1985. – 175 с.
4. ИСО 10993-1:2011. Оценка биологическая медицинских устройств. Ч. 1: Оценка и испытания. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 17 с.
5. Крагельский, И. В. Трение, изнашивание и смазка: справочник / И. В. Крагельский, В. В. Алисина. – Москва: Машиностроение, 1979. – 358 с.
6. ГОСТ ISO 7886-1–2011. Шприцы инъекционные однократного применения стерильные. Ч. 1: Шприцы для ручного использования. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 32 с.
7. Рабинович, С. А. Эволюция медицинского шприца: от вольнки до цифровых технологий / С. А. Рабинович, Ю. Л. Васильев, С. Т. Сохов. – Москва: Поли Медиа Пресс, 2013. – 104 с.
8. Физические основы современных методов исследования материалов: методические указания к лабораторным работам / Сост. Е. А. Рогачев. – Омск: ОмГТУ, 2017. – 45 с.
9. Кабатов, Ю. Ф. Медицинский инструментарий, аппаратура и оборудование / Ю. Ф. Кабатов. – Москва: Медицина, 1977. – 211 с.

10. **Коваленко, А. Е.** Усовершенствованные зубоорудочные инструменты / А. Е. Коваленко, В. А. Репин, В. Х. Сабитов // Медтехника. – 1975. – № 5. – С. 59–61.

11. **Крендаль, П. Е.** Медицинское товароведение / П. Е. Крендаль, Ю. Ф. Кабатов. – Москва: Медицина, 1974. – 464 с.

Статья сдана в редакцию 3 апреля 2020 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

Сергей Геннадьевич Монич, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет. E-mail: sgmonich@bntu.by.

Владимир Алексеевич Петров, студент, Белорусский национальный технический университет. E-mail: 7890pva4321@mail.ru.

Ахмад Али, магистрант, Белорусский национальный технический университет.

Mikhail Grigoryevich Kiselev, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

Sergey Gennadyevich Monich, PhD (Engineering), Belarusian National Technical University. E-mail: sgmonich@bntu.by.

Vladimir Alekseyevich Petrov, student, Belarusian National Technical University. E-mail: 7890pva4321@mail.ru.

Ahmad Ali, MSc student, Belarusian National Technical University.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко

МОДЕЛЬ В СРЕДЕ МАТЛАБ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА И ДВУХУРОВНЕГО ПОВЫШАЮЩЕ-ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ DC/DC

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. G. Kondratenko

A MATLAB MODEL OF THE ENERGY STORAGE DEVICE BASED ON A SUPERCAPACITOR AND A TWO-LEVEL BUCK-BOOST DC-DC CONVERTER

Аннотация

Для понижающе-повышающего (buck-boost) преобразователя DC/DC предложена структурная схема и на её основе – модель в среде МАТЛАБ, позволяющая моделировать работу емкостного накопителя. Представлены результаты моделирования работы емкостного накопителя с использованием понижающе-повышающего преобразователя DC/DC по разработанной модели.

Ключевые слова:

преобразователь (buck-boost) DC/DC, рекуперативный режим работы, частотно-регулируемый безредукторный электропривод лифта, энергосбережение, емкостной накопитель энергии, суперконденсатор.

Abstract

The paper describes a block diagram for a buck-boost DC-DC converter, and on its basis, a model in the MATLAB environment, which makes it possible to model the operation of a capacitive energy storage device. Based on the developed model, simulation results of the operation of the capacitive energy storage device using the buck-boost DC-DC converter are presented.

Keywords:

buck-boost DC-DC converter, recuperative mode of operation, variable frequency gearless electric drive in elevators, capacitive energy storage device, supercapacitor.

Частотно-регулируемые электропривода переменного тока применяются в различных технических и технологических приложениях. Эффективность их применения обусловлена надежностью электродвигателей переменного тока и высокими статическими и динамическими характеристиками реализуемых электроприводов. Энергоэффективность частотно-регулируемых элект-

троприводов для ряда механизмов дополнительно может быть увеличена использованием рекуператоров энергии в сеть или накопителей энергии в режимах, где возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энергии торможения [1]. Использование накопителей энергии (емкостных

на суперконденсаторах или аккумуляторных батареях) уделяется большое внимание. Одними из механизмов, где актуально использование рекуперированной энергии, являются подъемно-транспортные механизмы, в том числе лифты. Особенностью приводов лифтов является работа с меняющейся нагрузкой, что и обеспечивает работу привода как в двигательных режимах, так и в генераторных (рекуперативное торможение). Если в редукторных приводах

лифтов, с учетом КПД редуктора, использование генераторных режимов малоэффективно, то в безредукторных регулируемых приводах возвращаемая энергия при рекуперации существенно возрастает и появляется возможность использования рекуперированной энергии [2, 3].

Блок-схема регулируемого электропривода лифта, например с емкостным накопителем энергии (суперконденсатор), представлена на рис. 1.

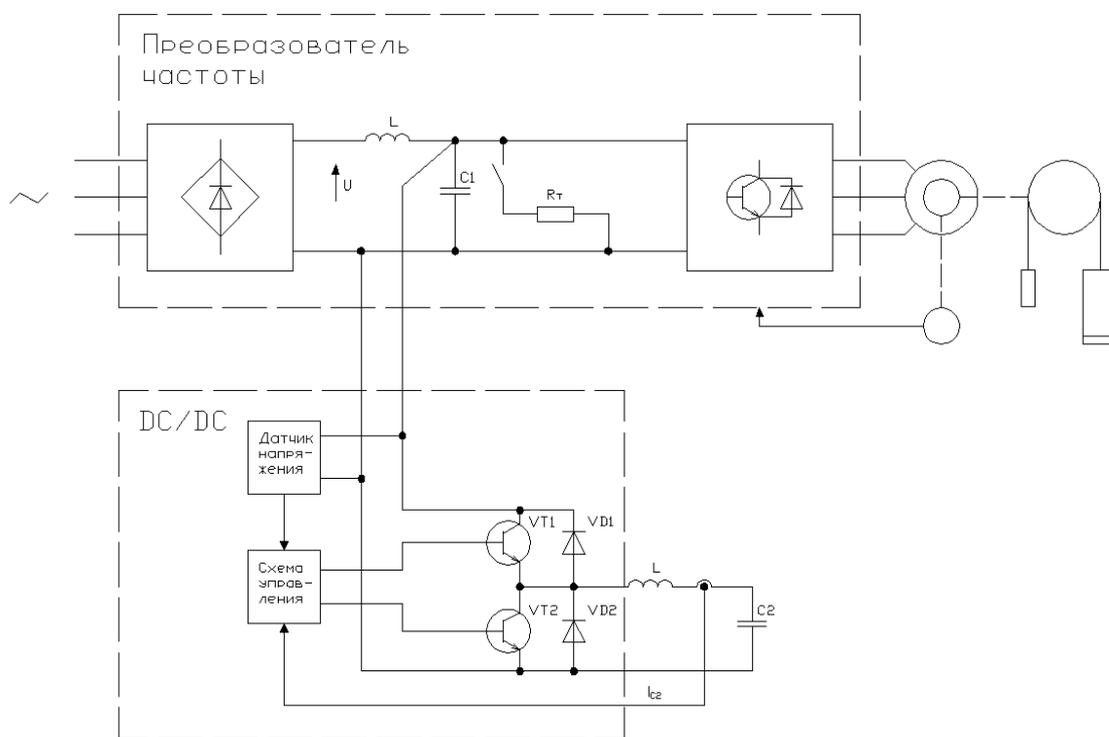


Рис. 1. Блок-схема электропривода лифта с преобразователем DC/DC и емкостным накопителем

Учитывая, что в рекуперативных режимах напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты существенно меняется, в таких приводах актуально использование преобразователей постоянного тока DC/DC для питания собственно накопителя [3].

Типовые варианты режимов работы для лифта, при которых возможна рекуперация и возврат энергии: подъем пустой кабины, спуск полностью гру-

женой кабины. Использование емкостного накопителя энергии позволяет получить и другие варианты обмена энергией между сетью и двигателем. Возможные варианты обмена энергией между питающей сетью, двигателем привода лифта и емкостным накопителем (Н), подключенным к шине постоянного тока преобразователя частоты (ПЧ), показаны на рис. 2.

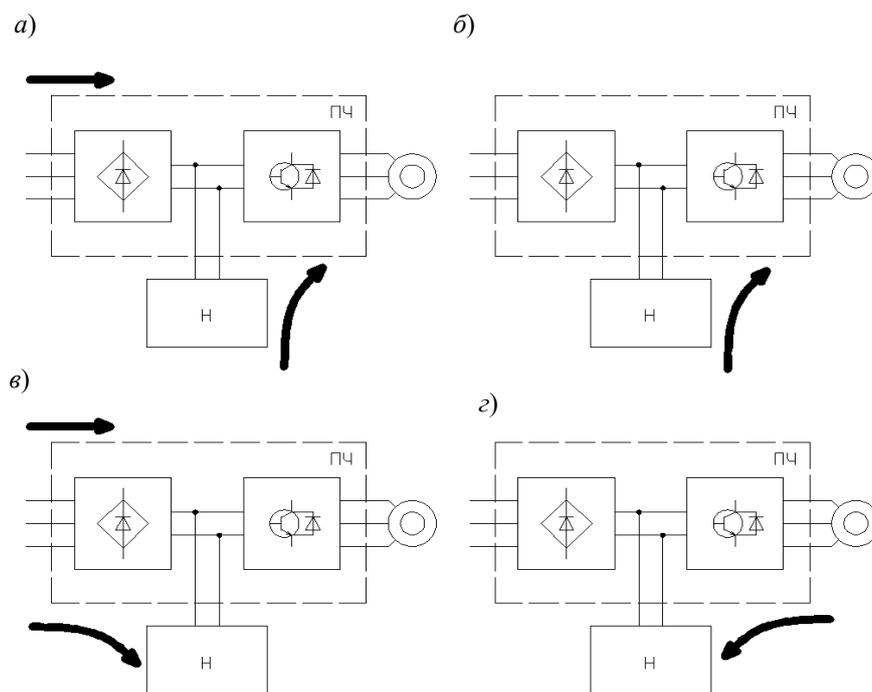


Рис. 2. Варианты обмена энергией между питающей сетью, двигателем привода лифта и емкостным накопителем

Рис. 2, а иллюстрирует режим работы привода лифта, при котором двигатель потребляет как энергию питающей сети, так и энергию, запасенную в накопителе. Если энергии накопителя достаточно, то возможна работа двигателя только от накопителя (см. рис. 2, б). Этот режим актуален для использования при кратковременной потере напряжения питающей сети и для сохранения работоспособности привода. В режиме, показанном на рис. 2, в, происходит подзарядка накопителя от питающей сети. При работе двигателя в режиме рекуперации энергии происходит накопление энергии в накопителе (см. рис. 2, г).

Как уже было отмечено, накопитель энергии должен быть построен на базе преобразователя постоянного тока ДС/ДС. Существуют различные конструктивные решения таких преобразователей [4].

При отсутствии необходимости в гальванической развязке емкостного накопителя и питающей сети простая и востребованная силовая схема понижа-

юще-повышающего преобразователя (buck-boost) DC/DC образована транзисторными ключами с обратными диодами (см. рис. 1). Такой преобразователь подключается на выход шины постоянного тока преобразователя частоты, как показано на рис. 1. Для нормальной работы емкостного накопителя в такой схеме напряжение на шине всегда должно быть больше, чем напряжение на суперконденсаторе. Схема обеспечивает регулируемое протекание тока как при заряде суперконденсатора, так и при его разряде за счет ШИМ-модуляции работы транзисторов (схема управления не показана). Если включен верхний транзистор VT1, происходит заряд конденсатора, в том числе и за счет энергии индуктивности (транзистор VT1 закрыт, работает нижний диод VD2). Режим возврата обеспечивается при работе нижнего транзистора VT2 и верхнего диода VD1. Расчет и выбор всех элементов такого преобра-

зователя приведен, например, в [5].

Расчетная схема без учета потерь в преобразователе (коэффициент переда-

чи k) для анализа процессов при заря- разряде конденсатора накопителя показана на рис. 3.

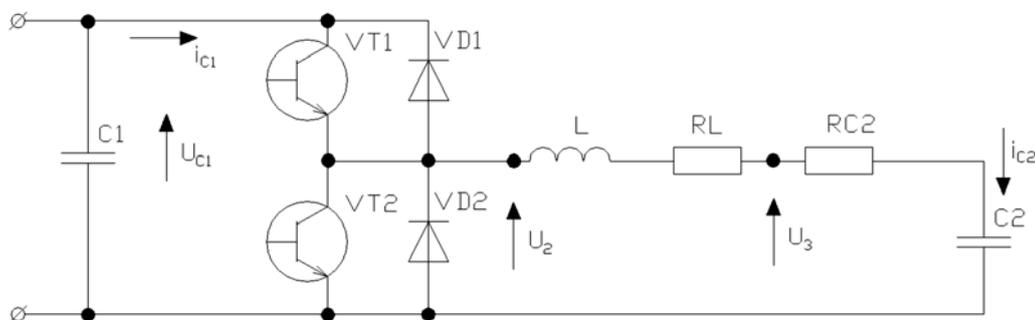


Рис. 3. Расчетная схема силовой части DC/DC преобразователя и емкостного накопителя: R_L и L – активное сопротивление и индуктивность дросселя; R_{C2} и $C2$ – внутреннее сопротивление и емкость суперконденсатора (линейная модель суперконденсатора [5]); $C1$ – емкость фильтра шины постоянного тока преобразователя частоты

Уравнения электрического равновесия для схемы на рис. 3 имеют вид:

$$\begin{aligned} U_2 - U_3 &= i_{c2}R_L + L \frac{di_{c2}}{dt}; \\ U_3 &= i_{c2}R_{c2} + U_{c2}; \\ U_{c2} &= \frac{1}{C_2} \int i_{c2} dt; \\ U_{c1} &= \frac{1}{C_1} \int i_{c1} dt; \\ U_{c2} &= kU_{c1}. \end{aligned} \quad (1)$$

получить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} U_2(s) - U_3(s) &= i_{c2}(s)(R_L + L)s; \\ U_3(s) &= i_{c2}(s)(R_{c2} + \frac{1}{C_2s}); \\ U_{c1}(s) &= i_{c1}(s) \frac{1}{C_1s}. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом уравнений (2) структурная схема регулирования напряжения на шине постоянного тока имеет вид, представленный на рис. 4.

Из уравнений (1) с использованием преобразования по Лапласу можно

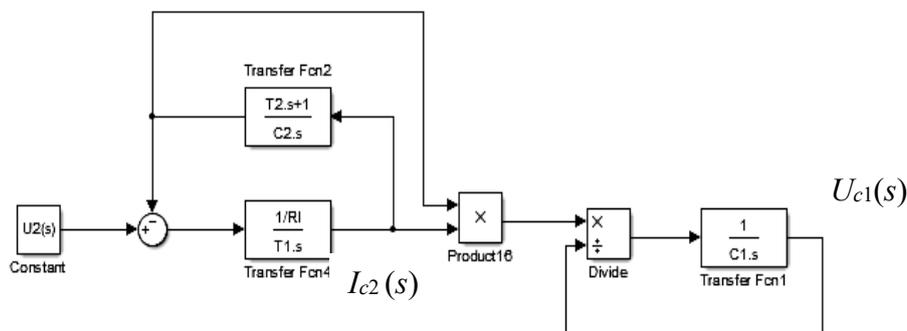


Рис. 4. Структурная схема DC/DC преобразователя при регулировании напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты: $U_{c1}(s)$ – напряжение на конденсаторе фильтра шины постоянного тока; $U_3(s)$ – напряжение на суперконденсаторе; $I_{c2}(s)$ – ток заряда-разряда суперконденсатора; $U_2(s)$ – напряжение на выходе преобразователя; T_2 и T_1 – соответствующие постоянные времени, $T_2 = R_{C2}C_2$ и $T_1 = R_L L$

Для структурной схемы (см. рис. 4) разработана модель в среде МАТЛАБ (рис. 5). Основные регулируемые параметры схемы (см. рис. 4): $I_{c2}(s)$ – ток конденсатора $C2$; $U_{c1}(s)$ – напряжение на шине. Эти параметры регулируются в рамках стандартной схемы регулирования напряжения на шине (конденсаторе $C1$) с использованием последовательно включенных соответствующих регуляторов тока Transfer Fcn1 (внутренний контур) и напряжения на шине

Transfer Fcn10 (см. рис. 5). Возрастание напряжения на шине постоянного тока при генераторных режимах работы моделируется блоком Signal Bulder2. Время существования генераторного режима задается в схеме (см. рис. 5) блоками Step3, Step4. Напряжение на шине определяется блоком Constant1.

Параметры схемы (см. рис. 5), используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

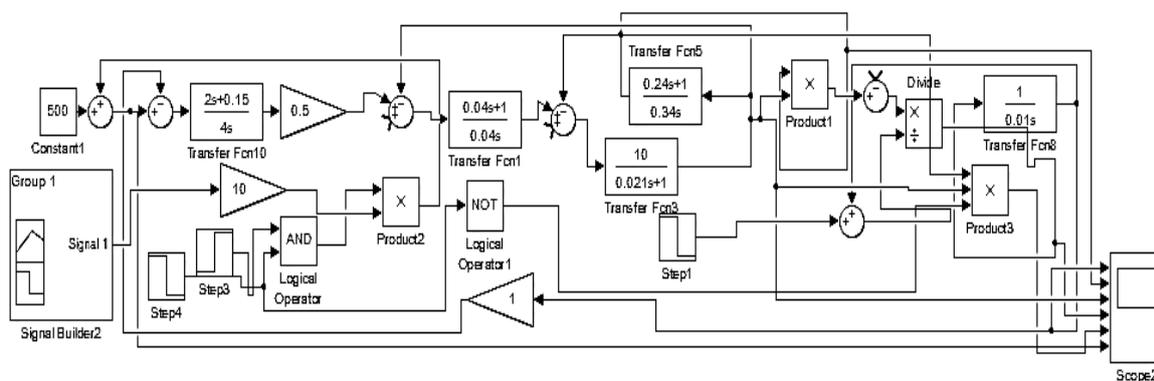


Рис. 5. Модель DC/DC преобразователя при регулировании напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты

Табл. 1. Параметры схемы

| R_{c2} , Ом | $C2$, Ф | L , мГн | R_{L} , Ом | $C1$, Ф | $U_{шины}$, В |
|---------------|----------|-----------|--------------|----------|----------------|
| 0,7 | 0,34 | 0,21 | 0,1 | 0,01 | 500 |

Динамические характеристики процессов заряда и разряда конденсатора $C1$ определяются настройкой регуляторов в системе регулирования напряжения на шине постоянного тока. Для ПИ-регуляторов, используемых в схеме (см. рис. 5), результаты моделирования показаны на рис. 6 и 7.

Для емкостного накопителя на основе востребованной двухуровневой схемы понижающе-повышающего (buck-boost) преобразователя постоянного напряжения DC/DC получена структурная схема и предложена модель в среде МАТЛАБ системы регулирования

напряжения на шине постоянного тока. Эта модель позволяет моделировать процессы заряда-разряда суперконденсатора накопителя. Результаты моделирования работы рассматриваемого преобразователя подтверждают работоспособность предложенной модели. Рассматриваемая схема емкостного накопителя может быть использована для повышения энергоэффективности частотно-регулируемых безредукторных электроприводов лифтов, и предложенная модель позволяет оценивать эффективность её использования в таких приводах.

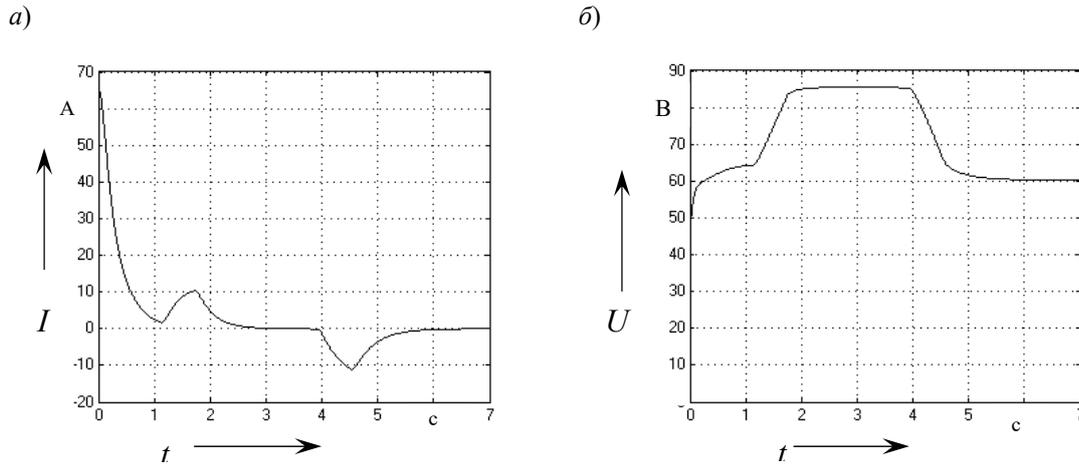


Рис. 6. Ток заряда–разряда конденсатора C2 (а) и напряжение на нём (б)

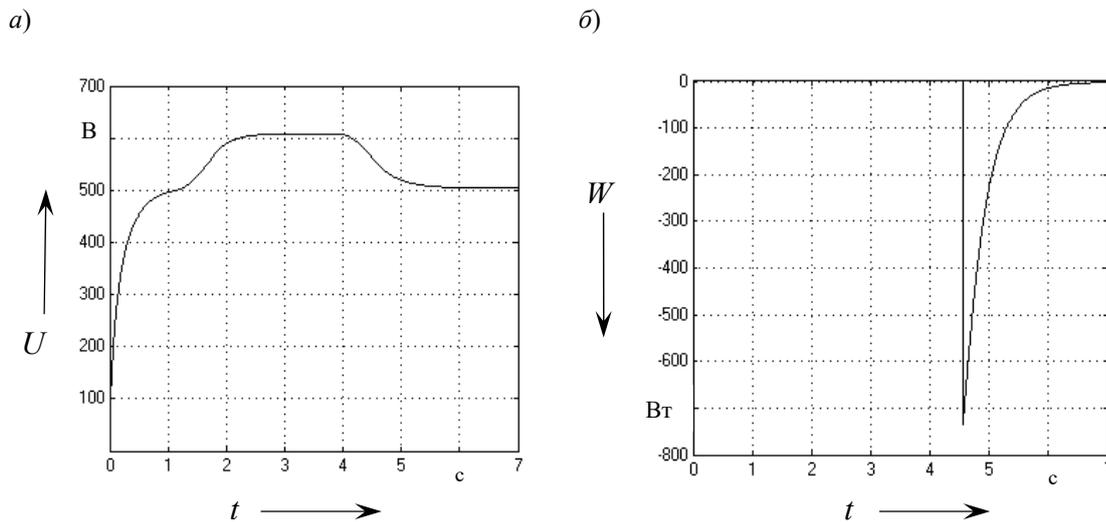


Рис. 7. Напряжение на конденсаторе C1 (а) и мощность, отдаваемая конденсатором C2 при разряде (б)

Выводы

Энергоэффективность частотно-регулируемых электроприводов может быть увеличена использованием накопителей энергии в режимах, где возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энергии торможения. Используемые емкостные накопители энергии на суперконденса-

торах предполагают для подключения к источнику генерируемого напряжения применение преобразователей постоянного тока DC/DC. Для двухуровневой схемы понижающе-повышающего преобразователя (buck-boost) DC/DC получена структурная схема и предложена модель в среде МАТЛАБ системы регулирования напряжения на шине постоянного тока. Результаты моделирования работы рассматриваемого преобразователя подтверждают работоспособ-

ность предложенной модели. Рассматриваемая модель может быть использована при моделировании процессов в частотно-регулируемых электроприво-

дах с аналогичным емкостным накопителем для оценки энергоэффективности его использования.

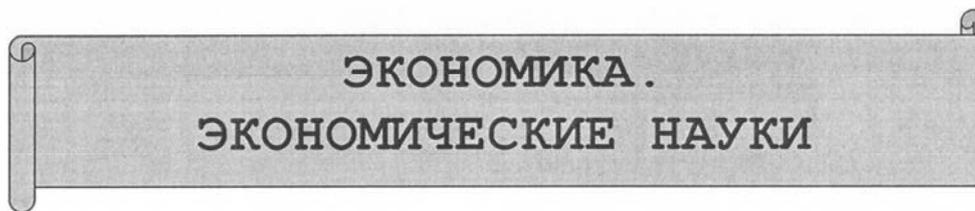
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 113–120.
2. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
3. **Barrade, P.** A supercapacitor-based energy storage system for elevators with soft commutated interface / P. Barrade // IEEE Trans. on Ind. Appl. – 2002. – Vol. 38, № 5. – P. 1151–1159.
4. **Ярославцев, М. В.** Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта / М. В. Ярославцев, Н. И. Щуров, В. Н. Аносов. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 136 с.
5. The ultracapacitor-based controlled electric drives with braking and ride-through capability: overview and analysis / P. J. Grobovic [et al.] // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, № 3. – P. 925–936.

Статья сдана в редакцию 10 февраля 2020 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Алексей Григорьевич Кондратенко, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Aleksey Grigoryevich Kondratenko, PhD student, Belarusian-Russian University.



УДК 381

С. Б. Самарцев

**РЕФЛЕКСИЯ ПАРАДИГМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
В УНИВЕРСИТЕТЕ 3.0**

UDC 381

S. B. Samartsev

**REFLECTIONS ON THE PARADIGM OF CONTINUING EDUCATION AT
UNIVERSITY 3.0**

Аннотация

В статье рассмотрен опыт работы Института повышения квалификации и переподготовки кадров в сфере дополнительного образования взрослых – одного из важнейших элементов предпринимательского университета. В ретроспективе показаны профессиональные подходы к совершенствованию направлений формирования кадрового потенциала Могилевской области и комплекса образовательных услуг, ориентированных на развитие бизнес-среды, инновационной и деловой активности корпуса специалистов.

Ключевые слова:

дополнительное образование взрослых, компетенции, непрерывное образование, переподготовка, повышение квалификации, университет.

Abstract

The paper considers the experience of the Continuing Education and Professional Development Institute in the field of continuing adult education, which is one of the most important elements of an entrepreneurial university. The retrospective survey shows the professional approaches to improving the formation of the personnel potential in the Mogilev region and the range of educational services aimed at developing a business environment, innovative and business activity of a pool of specialists.

Keywords:

additional adult education, competencies, continuing education, retraining, professional development, university.

Министерством образования Республики Беларусь дан старт экспериментальному проекту «Университет 3.0», в который вошли семь вузов республики, в том числе межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев.

«Университет 3.0» как предпри-

нимательский университет выполняет многие из функций вузов 1.0 и 2.0, однако в первую очередь нацелен на комплексное развитие образовательной, научно-инновационной и производственно-предпринимательской деятельности, генерируя вокруг себя коммерческие композиции в виде проектов НИР и ОКР, программ непрерывного образо-

вания, экспорта образовательных услуг, малых инновационных предприятий и пр. [1].

Парадигма непрерывного образования Белорусско-Российского университета интегрирует потенциал структурных подразделений вуза с целью реализации программ дополнительного образования взрослых (ДОВ) или обучения на протяжении всей жизни. Сегодня ДОВ гарантированно формирует профессиональные подходы к строительству общества высококвалифицированных специалистов при наименьших затратах. Необходимость смены профиля деятельности человека обусловлена цифровым эволюционированием общества, структурной перестройкой экономики и модернизацией предприятий, расширением спектра услуг и изменением кадровой потребности, демографической и миграционной проблемами, а также рядом других факторов.

Развитие ДОВ в университете сложилось в тридцатилетнюю историю, начиная с 1990 г., и первоначально было обусловлено открытием факультета повышения квалификации и переподготовки руководящих и инженерно-технических работников. Качественные образовательные услуги непрерывного образования в г. Могилеве начали оказывать в 1994 г., когда факультет был преобразован в региональный хозяйственно-расчетный центр повышения квалификации и переподготовки специалистов. В 1997 г. на базе регионального центра создан Институт повышения квалификации и переподготовки кадров (ИПК) при Могилевском машиностроительном институте на условиях самофинансирования, устав которого зарегистрирован в Министерстве образования 01.09.1998 г. приказом № 515. В этом же году сформирована и открыта кафедра «Совершенствование профессиональных знаний».

Ректором ИПК был назначен С. Б. Самарцев (автор данной статьи), который возглавляет подразделение в долж-

ности директора по настоящее время.

Становление такого перспективного образовательного направления происходило в то время, когда только формулировались цели, связанные с повышением конкурентоспособности университетов и экономической устойчивостью деятельности ДОВ в условиях перестройки и реформирования политического устройства общества, необходимостью повышения качества учебного процесса в соответствии с требованиями рынка труда, с повышением эффективности управления деятельностью учреждений образования.

Доминирование консервативных взглядов на репродуктивно-информационную передачу знаний, с одной стороны, и отсутствие методов инновационной подготовки специалистов, научной проработки дидактических положений и проблематики ДОВ, с другой стороны, обусловили создание Кодекса об образовании Республики Беларусь [2], систематизацию и формирование информационной базы по специальностям переподготовки и учебно-программной документации в виде Общегосударственного классификатора Республики Беларусь ОКРБ 011–2009 *Специальности и квалификации* [3], а также разработку стандартов специальностей переподготовки. Были упорядочены нормативные требования ко всему сегменту ДОВ и осуществлена работа по типизации учебных планов.

Фундаментальные компоненты университетского подразделения, учитывая кризисное состояние мировой экономики, последствия которого сохраняются и поныне, выстроили внутреннюю философию ДОВ с условиями функционирования, что предопределило лидирующие позиции ИПК в региональном секторе образовательных услуг, меры, направленные на расширение контингента слушателей и модернизацию ресурсной базы.

В этот период важным моментом развития следует считать концентрацию

усилий ИПК на сохранении, использовании и преумножении знаний, умений и навыков в традиционно сильных образовательных направлениях сменившего название технического университета, среди них – электрообрудование объектов, грузоподъемные машины и краны, методы контроля изделий, сварочное производство и др. В связи с открытием в вузе экономического факультета была предпринята успешная попытка расширить зону подготовки персонала по таким востребованным специальностям ДОВ, как бухгалтерский учет, экономика управления, менеджмент коммуникаций и пр. Вместе с тем, ИПК сосредоточился на обучении населения иностранным языкам в связи с массовым выездом репатриантов, неразвитостью института индивидуального предпринимательства, отсутствием иных организаций с соответствующей направленностью и формированием переходной экономики и внешнеэкономических связей в стране. Практиковалось также корпоративное обучение персонала в организациях, регулярные внеаудиторные встречи клуба Hidden Rules of Englishness, что актуально и сегодня.

Кроме того, поручение институту в течение относительно короткого периода времени (1999–2011 гг.) подготовки специалистов с сокращенным сроком обучения по специальностям «Бухгалтерский учет, анализ и аудит» и «Экономика и управление на предприятии» (специализация «Деловое администрирование») стало значимым событием. Во-первых, ИПК удалось существенно расширить и обновить ресурсное обеспечение процесса (материально-техническую базу, информационно-библиотечное и кадровое обеспечение). Во-вторых, соответствующим образом была спроектирована организационная процедура, обновлены учебно-методическое и научное обеспечение образовательного процесса. Полученные компетенции немедленно переформатировались в систему переподготовки, через

аспирантуру и магистратуру формировался собственный состав высококвалифицированных преподавателей, были открыты новые структурные подразделения института, которые работают и сейчас: центр подготовки вождению транспортных средств, центр оперативной полиграфии, магазин канцелярских товаров.

Деятельность ИПК четко ориентирована на обеспечение единства основного и дополнительного образования взрослых, во главе которого – создание образовательных программ на основе информационно-коммуникационных технологий и профессионально-педагогической квалификации преподавателей ДОВ. В перечне реализуемых программ – образовательные программы повышения квалификации, переподготовки кадров, стажировка, главным образом по профилю основных программ высшего образования, а также различные обучающие курсы, семинары и др. Подобное структурирование успешно решает важнейшие задачи непрерывного образования: неразрывным становится цикл подготовки в системе высшего образования, переподготовки специалистов и профессорско-преподавательского состава; в образовательных программах ДОВ отражаются реальные потребности отраслей экономики страны и особенности регионального развития; научно-педагогические работники университета системно повышают квалификацию не только по профилю деятельности, т. е. в сфере технического образования, но и в области педагогической методологии, информационно-коммуникационных технологий, в том числе посредством разработки дополнительных профессиональных программ, методического обеспечения, прямого участия в их реализации и оперативной обратной связи между слушателем и работодателем.

Подтверждением признания высокого уровня исследования вопросов ДОВ и организации учебного процесса

стали защиты кандидатских диссертаций преподавателями ИПК, многие из руководителей факультетов вуза в свое время получили образование по выбранным специальностям переподготовки. Кроме того, институтом был предложен, организован и длительное время проводился международный научно-практический семинар «Система непрерывного образования в общеевропейском контексте: перспективы, развитие, профессионализм» с привлечением специалистов из Австрии, Германии, Италии, России, Франции и других стран. Ежегодно с 2010 по 2017 гг. преподаватели и сотрудники ИПК принимали активное участие в работе семинара. Существенным результатом этого стало значительное число публикаций педагогов университета. В статьях сотрудников отражался накопленный опыт проектирования содержания образовательных программ ДОВ, формирования профессиональной компетентности преподавателей университетов, разработки инновационных образовательных технологий и пр. В фокусе внимания авторов публикаций – особенности осуществления переподготовки и повышения квалификации кадров в Беларуси, России и ЕС, проблемы правового регулирования высшего и дополнительного образования, учебно-методическое обеспечение учебного процесса и др.

В связи с успешной аттестацией ИПК в составе университета и аккредитацией специальностей переподготовки сформулированы ключевые задачи: совершенствование качества управления по всем аспектам дополнительного образования и реструктуризация организационной структуры подразделения.

Сегодня ИПК является одним из крупнейших коммуникационных центров ДОВ в регионе. За 30 лет профессиональной деятельности института в 375 учебных группах прошли переподготовку свыше 6200 специалистов, преподавателей и сотрудников. За послед-

ние 5 лет число слушателей-выпускников программ переподготовки увеличилось на 16,5 % и ежегодно составляет 120–170 человек.

В соответствии с действующим разрешением (лицензией) ИПК осуществляет переподготовку руководящих работников и специалистов, имеющих высшее образование, по четырем профилям и 11 специальностям (табл. 1):

Д «Гуманитарные науки» – одна специальность (9,1 %);

Е «Коммуникации. Право. Экономика. Управление. Экономика и организация производства» – пять специальностей (45,5 %);

И «Техника и технологии» – четыре специальности (36,4 %);

Ж «Архитектура и строительство» – одна специальность (9,1 %).

На протяжении длительного периода в регионе ИПК выполнял роль своеобразного «штаба», формирующего перечень нужных специальностей переподготовки. Некоторые из них – «Бухгалтерский учет и контроль в промышленности», «Программное обеспечение информационных систем», «Современный иностранный язык», «Правоведение» – были открыты раньше, чем в других учреждениях образования, но продолжают оставаться востребованными до сих пор, несмотря на то, что обучение в университете по аналогичным специальностям получения высшего образования не ведется.

Такие специальности, как «Деловое администрирование», «Финансы», «Коммерческая деятельность на рынке товаров народного потребления» (сейчас «Коммерческая деятельность на рынке товаров потребительского спроса») и «Банковское дело» по-прежнему продолжают играть важную роль в подготовке экономических кадров области. Причем набор на отдельные специальности производится не ежегодно, а исходя из потребности.

Табл. 1. Специальности переподготовки по ОК РБ 011–2009, количество учебных групп и выпускников ИПК

| Название, шифр специальности переподготовки, дата открытия | Количество учебных групп* | Количество выпускников* |
|--|---------------------------|-------------------------|
| 1-25 03 75 Бухгалтерский учет и контроль в промышленности, 05.03.1992 | 126 / 3 | 2794 / 24 |
| 1-26 02 74 Деловое администрирование, 08.08.2006 | 34 / 3 | 440 / 32 |
| 1-25 02 71 Финансы, 08.08.2006 | 9 | 95 |
| 1-25 04 71 Коммерческая деятельность на рынке товаров народного потребления, 08.08.2006 | 11 | 130 |
| 1-25 02 72 Банковское дело, 08.08.2006 | 1 | 6 |
| 1-40 01 73 Программное обеспечение информационных систем, 13.06.1998 | 25 / 1 | 424 / 15 |
| 1-59 01 01 Охрана труда в машиностроении и приборостроении, 18.12.2003 | 15 / 2 | 206 / 39 |
| 1-54 01 74 Неразрушающий контроль материалов и изделий, 19.07.2002 | 2 | 15 |
| 1-70 02 71 Промышленное и гражданское строительство, 15.10.2008 | 21 / 1 | 207 / 13 |
| 1-24 01 71 Правоведение, 28.03.1996 | 83 / 3 | 1570 / 24 |
| 1-21 06 74 Современный иностранный язык (английский и немецкий языки), 22.02.1993 | 48 / 1 | 324 / 8 |
| <i>Примечание – * – в знаменателе количество учебных групп и слушателей, продолжающих обучение на 31 марта 2020 г.</i> | | |

Другие специальности, среди которых «Охрана труда в машиностроении и приборостроении», «Неразрушающий контроль материалов и изделий» и «Промышленное и гражданское строительство», оказались предложенными на рынке труда Могилевской области только Белорусско-Российским университетом. Подготовка слушателей по ним опирается на кадровый потенциал кафедр университета «Безопасность жизнедеятельности», «Физические методы контроля» и «Промышленное и гражданское строительство», а также на преподавательский персонал Архитектурно-строительного колледжа в составе Белорусско-Российского университета.

Переподготовка современных специалистов с учетом потребностей общества требует выполнения четких квалификационных требований, которые сформулированы в образовательном стандарте специальности. В соответствии с ними основными условиями качественной подготовки являются глубо-

кие базовые гуманитарные, социально-экономические и общепрофессиональные знания слушателей, позволяющие наиболее полно раскрыть ресурсы дисциплин специальности и использовать рациональные образовательные технологии образовательного процесса.

Успешное освоение обучающимися образовательных программ высшего образования в области физических методов контроля объектов позволило университету как ведущему вузу направления стать разработчиком образовательного стандарта и типового учебного плана по специальности переподготовки «Неразрушающий контроль материалов и изделий», которые составили профессорско-преподавательским составом кафедры «Физические методы контроля».

Развитие долгосрочных партнерских отношений ИПК с ведущими предприятиями различной направленности во многом обусловлено наличием необходимого кадрового потенциала в

вузе – преподавателей-практиков, которые не только прекрасно знают предметную область, но и владеют необходимыми педагогическими технологиями, могут применять свой опыт в работе со слушателями ДОВ. Кроме того, большое внимание уделяется профориентационной работе с руководителями, начальниками подразделений и специалистами организаций по определению потребностей в развитии персонала, разработке и реализации программ повышения квалификации. Зачастую сотрудники и преподаватели ИПК являются участниками НИР и ОКР по заказу соответствующей компании или приглашаются в качестве экспертов для оценки состояния технологических процессов.

В связи с этим в университете активизируются шаги по актуализации ДОВ в форме повышения квалификации на уровне среднего специального и высшего образования по следующим профилям (направлениям) образования:

Е «Коммуникации. Право. Экономика. Управление. Экономика и организация производства» (направления образования «Экономика», «Управление»);

І «Техника и технологии» (направления образования «Оборудование», «Автоматизация», «Вычислительная техника», «Обеспечение качества», «Транспортная деятельность»);

Ј «Архитектура и строительство» (направление образования «Строительство»);

Д «Гуманитарные науки» (направление образования «Гуманитарные науки»);

Г «Естественные науки» (направление образования «Естественные науки»).

В университете, где шесть из восьми факультетов имеют техническую направленность, в первую очередь в ДОВ должны применяться компетенции в соответствующих профильных направлениях (табл. 2).

Табл. 2. Процент специалистов, прошедших повышение квалификации в ИПК по профилям (направлениям) образования

| Профиль (направление) | 2015 г. | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Е | 5,0 | 11,4 | 26,5 | 30,9 | 29,1 |
| І | 72,5 | 78,7 | 67,1 | 65,3 | 66,7 |
| Ј | 13,8 | 1,2 | 1,8 | – | – |
| Д | 8,7 | 8,7 | 4,6 | 3,9 | 4,2 |

Действительно, количество слушателей профиля І «Техника и технологии» совместно со слушателями профиля Ј «Архитектура и строительство» в лучшие годы составляло 86,3 % от всего набора специалистов на курсы повышения квалификации. Наибольшую готовность к курсам по эксплуатации, ремонту, наладке, обслуживанию, проектированию систем автоматического (автоматизированного) управления и

противоаварийной защиты для взрывоопасных сред, включая оборудование во взрывозащищенном исполнении, проявили работники крупнейших промышленных организаций Республики Беларусь – ОАО «Интеграл», ОАО «Светлогорский ЦКК», ОАО «Электротехмонтаж», предприятия нефте-, газохимического комплекса страны ОАО «Гродно Азот», ОАО «Нафтан», ОАО «Мозырский НПЗ», ОАО «Могилевхимволок-

но», ОАО «Гродненский институт азотной промышленности», РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», ОАО «СветлогорскХимволокно», ОАО «Лакокраска» и многих других. Общее количество специалистов, прошедших такое обучение с 2014 г., составило более 2200 человек.

Дело в том, что университет постановлением коллегии Госпромнадзора Республики Беларусь признан головной организацией по взрывозащищенному электрооборудованию и электроустановкам во взрывозащищенных зонах. В утвержденном Положении о головной организации предусмотрено проведение профессиональной подготовки, переподготовки, повышения квалификации и аттестации специалистов. Таким образом, образовательные программы, обеспечивающие повышение квалификации кадров по направлению, преобразуют компетенции и опыт преподавателей и сотрудников ИПК по разработке проектно-сметной, конструкторской и технической документации объектов, экспертные оценки обследований поднадзорных производств и прочие услуги в коммерческие результаты интеллектуального труда.

К сожалению, благодаря принятым мерам, преследующим конъюнктурные интересы, подготовка по направлению «Строительство» почти прекратилась, однако в последние годы увеличился примерно до 30 % прием специалистов по профилю Е. Справедливости ради следует отметить, что среди них основная масса – преподаватели и сотрудники университета, которые проходят плановое повышение квалификации в сфере управляющих технологий один раз в 5 лет. С этой целью в ИПК для учреждений образования разработан ряд специализированных программ повышения квалификации преподавателей и сотрудников: «Управление деловыми коммуникациями в контексте современных психолого-педагогических концепций», «Управление ин-

формационными и деловыми коммуникациями в структурных подразделениях университета», «Социально-технологическая мобильность учебно-вспомогательного персонала университета», «Организационная и корпоративная культура современного вуза: формирование, поддержание и развитие», «Проектное управление и менеджмент персонала: стратегические направления», «Современные информационно-коммуникационные технологии» и мн. др. В данных программах значительная часть учебных часов отводится круглым столам, семинарам, тренингам, анализу конкретных производственных ситуаций, ролевым и деловым играм.

Подчеркнем, что подобная платформа и ее содержание для обучения персонала университета стали важным этапом подготовки к государственной аккредитации учреждения образования на соответствие заявленному виду, аккредитации по специальностям в Республике Беларусь и государственной аккредитации образовательной деятельности по основным профессиональным программам Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки Российской Федерации.

Институту вручены благодарственные письма и грамоты организаций и учреждений – заказчиков корпоративных курсов повышения квалификации руководящих работников и специалистов по проблематике управления коммуникациями и конфликтологией, среди них – главное управление Национального банка Республики Беларусь по Могилевской области, ОАО «Моготекс», УП «Могилевское отделение Белорусской торгово-промышленной палаты», Могилевский филиал РУП «Белтелеком», УО «Могилевский государственный областной институт развития образования», Могилевское областное управление департамента охраны МВД Республики Беларусь и др.

Наряду с программами ДОВ, соответствующими базовой технологиче-

ской направленности вуза, устойчивым спросом пользуются такие программы, как «Менеджмент и правовое регулирование государственных закупок в Республике Беларусь», подготовка и повышение квалификации временных (антикризисных) управляющих, «Противодействие коррупции: правовые, кадровые, организационные аспекты. Борьба с коррупцией», а также программы по управлению энергосберегающими технологиями EUREM и повышению энергоэффективности в организациях, по направлениям «Финансово-хозяйственный контроль», «Бухгалтерский учет в бюджетных организациях» и др., по подготовке ответственных за радиационную безопасность и радиационный контроль, промышленную безопасность, по охране труда и законодательству о труде и пр.

Создание в университете в 2008 г. Центра сертификации и испытаний при кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» как самостоятельного хозрасчетного подразделения, которым руководит д-р техн. наук, проф. В. П. Куликов, позволило организовать повышение квалификации специалистов сварочного производства, осуществляющих руководство сварочными работами на объектах использования атомной энергии (обеспечение ядерной и радиационной безопасности), и специалистов, работающих в иных областях сварочного производства в республике. Полученные при обучении в ИПК компетенции слушатели используют в Центре при прохождении сертификации или аттестации.

При разработке образовательных программ учитываются специфика производства (необходимость реструктуризации или модернизации в соответствии с инвестиционным проектом) и контингент направляемых на обучение слушателей. Как правило, это руководители и специалисты, имеющие опыт профессиональной деятельности, собственную мотивацию, четко определенные цели и

намерения, к тому же рассматривающие обучение как возможность решить конкретную инженерную задачу, важную для обучающегося и организации в целом. В свою очередь, подготовка педагога к проведению занятий и необходимость оказания консалтинговых услуг при итоговом контроле знаний, например, в форме защиты выпускной работы по спроектированному объекту, позволяют актуализировать учебные ресурсы, изучить проблемы реального производства, ознакомиться с передовыми технологиями отрасли и т. д. [4].

Предложенная схема организации образовательного процесса опробована при реализации таких программ ДВО, как «Применение средств конечно-элементного анализа ANSYS для компьютерного моделирования», «Статистический анализ и визуализация данных с помощью языка R», «Компьютерное моделирование с помощью программных продуктов Solidworks и Mathcad», «Проектирование автомобильных дорог с помощью средств компьютерного моделирования «Кредо Дороги», «Информационное моделирование объектов строительства с помощью BIM-технологий» и т. д.

В упомянутых программах используются самые современные информационно-коммуникационные технологии, а обучение проходит на базе сертифицированных программных продуктов в новейших классах.

В целом за последние 5 лет общее количество работников организаций производственной сферы и учреждений образования, осуществивших повышение квалификации в ИПК, достигло 5400 человек.

Несомненно, деятельность структурных подразделений ДОВО, обеспечивающих функционирование сферы, происходит в условиях «семантической инфляции», причем влияние глобализации, фазовой трансформации, вызванной информатизацией экономики, а теперь срыва сделки с ОПЕК и пандемии,

невозможно недооценивать.

Образовательные программы повышения квалификации минимизируют в процессе так называемых «закупок» за счет меньших объемов программы (достаточно 36 учебных часов для получения свидетельства установленного образца), университетские доценты и профессора заменяются на преподавателей средних учебных заведений, эксперты к образовательному процессу не привлекаются. Происходит подмена освоения актуальных компетенций на перечень заурядных вопросов об общих и практических знаниях в объектной области, обеспечении качества, практическом понимании принципов и методов работы объекта, способности распознавания инженерно-технической документации, применении и использовании соответствующих стандартов и пр. Аттестация и сертификация работников на уровне «вчерашних» технологий игнорирует современный ландшафт и динамику обновления цифровых компетенций, которые обуславливают нарастающий инновационно-технологический переворот в экономике, повышение квалификации кадрового состава организаций и тем самым тормозят прогрессивные структурные сдвиги в жизни государства. Кроме того, практикуется регулирование правил повышения квалификации по направлениям путем полного отказа от систематического обучения, особенно важно, что в отраслях с повышенной опасностью не согласуются управляющие документы и пр. Последний случай как раз иллюстрирует трансформацию периодичности прохождения повышения квалификации специалистов в документах разных ведомств.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 31610.19–2014/IEC 60079–19 : 2010 *Взрывоопасные среды. Часть 19. Ремонт, проверка и восстановление электрооборудования* в п. 4.4.1.3 трактует необходимость повышения квалификации руководящих работников (технических руководителей) и специалистов,

занятых ремонтом, техническим обслуживанием (эксплуатацией, монтажом, наладкой), проектированием взрывозащищенного электрооборудования, КИПиА, электроустановок во взрывоопасных зонах «... не реже одного раза в три года». С другой стороны, технический кодекс установившейся практики ТКП 181–2009 (02230) *Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей* в п. 6.4.18 рекомендует проходить обучение с такой же формулировкой. Однако постановлением Министрства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 29.12.2017 г. № 54 «Правила по обеспечению промышленной безопасности взрывоопасных химических производств и объектов» срок между периодами повышения квалификации увеличен до 5 лет.

Другие подобные феномены и меморандумы – как избежать влияния трудноформализуемости контента на рынок повышения квалификации – описаны в [5–7].

Таким образом, успешная реализация программы развития непрерывного образования в рамках проекта «Университет 3.0» зависит от завершения постиндустриального перехода страны, уменьшения противоречий из-за изменения структуры экономики, потери рынков, диверсификации образовательных программ, а также понимания того, что успешность преобразований четвертой промышленной революции (Industry 4.0) должна быть непосредственно связана с главным ресурсом – популяризацией тренда и формированием высоких образовательных стандартов ДОВ для достижения качественного обучения.

Одним из значимых успехов заживающего тридцатилетия было закрепление ИПК на безопасном финансово-экономическом уровне, что позволило планировать деятельность с большей уверенностью и амбициями. Историческая дата, которая отмечается в этом году, указывает на то, что коллек-

тив охотно сотрудничает как с физическими лицами, так и с многочисленными организациями, предлагая на постоянной основе пользующиеся успехом образовательные услуги или адаптируя их к условиям современного технологического производства, соответствующим требованиям нового поколения

выпускников.

Институт в эпоху быстрых изменений должен поддерживать свою изобретательскую традицию, направив на пользу дела все усилия и потенциал, чтобы повысить престиж и конкурентоспособность Белорусско-Российского университета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Университеты в современной парадигме промышленности / С. О. Каминская, С. Б. Самарцев, К. С. Самарцев, К. Фрайлингер // Система непрерывного образования в общеевропейском образовательном контексте: перспективы, развитие, профессионализм: сб. науч. ст. Междунар. образоват. семинара, Могилев, 11–18 февр. 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 24–32.
2. Кодекс Республики Беларусь об образовании. – Минск: РИВШ, 2011. – 352 с.
3. Переподготовка руководящих работников и специалистов в Республике Беларусь: справочник / Под науч. ред. О. А. Олекс. – Минск: РИВШ, 2009. – 256 с.
4. **Иванов, В. Г.** Повышение квалификации инженерных кадров: организационные новации и образовательные технологии / В. Г. Иванов, О. Ю. Хацринова, С. В. Барабанова // Высшее образование в России. – 2014. – № 6. – С. 43–50.
5. О проблемах и путях реализации программ дополнительного образования взрослых / С. Б. Самарцев, С. О. Каминская, Р. В. Силин, К. С. Самарцев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2019 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 439–440.
6. **Самарцев, С. Б.** Формирование и перспективы обновления парадигмы дополнительного образования взрослых / С. Б. Самарцев, С. О. Каминская, К. С. Самарцев // Личность. Образование. Общество. Формирование педагога будущего: от компетентности к самореализации: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Гродно, 31 окт. 2019 г.: в 2 ч. – Гродно: Гродн. обл. ин-т развития образования, 2019. – Ч. 1. – С. 126–128.
7. **Самарцев, С. Б.** О проблемах и путях реализации программ дополнительного образования взрослых / С. Б. Самарцев, С. О. Каминская, К. С. Самарцев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, 23–24 апр. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 468–469.

Статья сдана в редакцию 10 марта 2020 года

Сергей Борисович Самарцев, канд. техн. наук, доц., Институт повышения квалификации и переподготовки кадров Белорусско-Российского университета. E-mail: ssamar@yandex.ru.

Sergei Borisovich Samartsev, PhD (Engineering), Associate Prof., Continuing Education and Professional Development Institute of the Belarusian-Russian University. E-mail: ssamar@yandex.ru.

УДК 669.018

К. А. Токменинов

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

UDC 669.018

K. A. Tokmeninov

SOME DIRECTIONS OF PROSPECTIVE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Аннотация

Выявлены и рассмотрены некоторые основные тенденции и факторы, способствующие развитию промышленных предприятий в Республике Беларусь и повышению конкурентоспособности продукции. Выделены четыре главных направления перспективного развития предприятий. Даны анализ и оценка основных составляющих и тенденций развития промышленных предприятий.

Ключевые слова:

инновации, композиционный материал, новые технологии, тренд развития, отрасль промышленности.

Abstract

The paper identifies and considers some of the main trends and factors contributing to the development of industrial enterprises and the increase in the competitiveness of products in the Republic of Belarus. Four main directions in the long-term development of enterprises are given. The analysis and assessment of the main components and development trends of industrial enterprises are presented.

Keywords:

innovation, composite material, new technologies, development trend, industry.

На настоящем этапе развития общества быстрыми темпами развиваются инновационные цифровые технологии. Это, в свою очередь, стимулирует быстрое развитие всех направлений деятельности промышленности.

Рассмотрим некоторые перспективные направления научно-технического прогресса, которые будут способствовать развитию промышленных предприятий Республики Беларусь, росту конкурентоспособности продукции за счет повышения качества и снижения цены.

Появляются новые перспективные виды конструкционных материалов, например, полимерных композиционных материалов – углепластиков, орга-

нопластиков, стеклопластиков, металлокерамических материалов и др. Начинают находить широкое применение инновационные технологии и оборудование, в частности, водообразивная и лазерная обработка металлов, порошковая металлургия, 3D-печать и др.

Совершенствуются процессы конструирования изделий с учетом появления новых программных продуктов, применения новых материалов и технологий производства, что позволяет создавать новые нетрадиционные виды изделий с качественно более высокими технико-экономическими характеристиками. Примером может служить авиационная отрасль. В конструкции современных летательных аппаратов приме-

нение полимерных композиционных материалов составляет 30 % и более, что позволило вывести их технико-экономические параметры на качественно новый уровень. Аналогичная тенденция замены традиционных металлов на композиты наблюдается на транспорте и в других отраслях промышленности. В автомобилестроении расширяется практика замены стальных сплавов на композиты. В Российской Федерации недавно на заводе «Уралкриомаш» успешно освоен новый вид продукции – железнодорожные цистерны из стеклопластиков. Основной технологией изготовления подобных изделий является спиральная намотка на станках с числовым программным обеспечением.

Применение новых материалов в Республике Беларусь позволяет ей производить конкурентоспособную продукцию в рамках импортозамещения. В стране хорошо развита химическая промышленность, выпускаются все исходные компоненты для полимерных композиционных материалов, что делает это направление развития весьма перспективным.

Важным направлением повышения конкурентоспособности продукции белорусских предприятий является снижение энергетической составляющей в себестоимости продукции.

Производство энергии в Республике Беларусь в настоящее время преимущественно осуществляется на ТЭЦ, что связано со сжиганием углеводородов, которые импортируются из-за рубежа. Стоимость углеводородов неизбежно возрастает. Этот вид топлива является исчерпаемым и со временем странам, экспортирующим углеводороды, приходится осваивать новые труднодоступные источники, что приводит к удорожанию добываемых природных ресурсов. Например, Российская Федерация начинает широкомасштабное

освоение шельфа Ледовитого океана.

В Республике Беларусь имеются возможности по реальному снижению энергетических затрат за счет внедрения новых технологий производства, нового оборудования, использования новых конструктивных решений.

Важным направлением повышения сбыта продукции и прибыли предприятий является диверсификация выпускаемой продукции в соответствии с тенденциями и трендом развития соответствующей отрасли промышленности. Развитие производств и технологий, использование инновационного оборудования, в частности, обрабатывающих центров и робототехнических комплексов, комплексная автоматизация приводят к появлению принципиально новых видов продукции, которые вытесняют с рынка традиционную продукцию предприятий. Учитывая этот факт, повышенную значимость на предприятиях приобретает постоянный мониторинг рынка и разработка стратегии по видам и объемам выпускаемой продукции.

Освоение новых инновационных видов продукции связано со значительными капитальными затратами. Это приобретение и внедрение нового вида оборудования, изготовление технологической оснастки, обучение и повышение квалификации персонала и др. В каждом конкретном случае требуется разработка инвестиционного проекта с определением сроков окупаемости проекта, оценкой его прибыльности и рентабельности. Для технико-экономического обоснования инновационных проектов необходимо выполнение ряда прогнозов и аналитических расчетов, связанных с предполагаемыми объемами сбыта перспективной продукции, определением источников финансирования и т. д.

Рассмотрим некоторые перспективные направления развития промышленных предприятий на примере пред-

приятый г. Могилева и области.

Первым направлением повышения эффективности деятельности промышленных предприятий является обязательное обоснование необходимости диверсификации продукции с учетом тенденций развития соответствующей отрасли промышленности, с мониторингом рынка, выявлением трендов развития отрасли, выработкой на этой базе стратегических планов предприятия и номенклатуры продукции.

Рассмотрим данное направление развития предприятия на примере ОАО «Строммашина», которое специализируется в основном на выпуске оборудования для строительной отрасли. Предприятие является банкротом и находится в состоянии санации. Основной продукцией предприятия длительный период было оборудование для заводов по производству кирпича и тротуарной плитки. Оборудование для производства кирпича в прежнее время было востребованным, пока дома возводились из кирпича с несущими стенами. Однако в 60-е гг. прошлого столетия технологии строительства получили новое направление развития – крупнопанельное домостроение, при котором элементы зданий изготавливались в виде панелей на домостроительных комбинатах. Эта технология имеет широкое применение и в настоящее время. Спрос на оборудование для производства кирпича стал падать. В начале нынешнего тысячелетия в строительной отрасли появились новые технологии – монолитное домостроение. Дома возводятся путем заливки каркаса из железобетона. Стены не являются несущими элементами и изготавливаются после изготовления каркаса из газосиликатных блоков. Для изготовления каркаса необходима специальная скользящая опалубка, спрос на которую достаточно велик.

В связи с изменениями в технологиях домостроения существенно возрос

спрос также на оборудование для производства газосиликатных блоков. Однако на ОАО «Строммашина» выпуск этих видов оборудования не был освоен.

Для производства газосиликатных блоков в г. Могилеве на ЗАО «Могилевский КСИ» было приобретено оборудование производства ФРГ. «Группа компаний «Газосиликат» для производства газосиликатных блоков приобрела оборудование производства КНР.

В начале нулевых годов в городах Республики Беларусь активно осуществлялась замена асфальтового покрытия тротуаров на плиточное. Появился спрос на оборудование для производства плитки. Но всплеск этого спроса временный. По мере замены асфальтового покрытия на плитку спрос на нее падает, т. к. такое покрытие долговечное. Соответственно, снизился спрос на оборудование для производства обычной тротуарной плитки.

Указанные тренды в развитии строительной отрасли и потребности оборудования для нее по разным причинам не были учтены в планах развития ОАО «Строммашина». Как следствие, сбыт продукции предприятия сильно сократился.

В качестве позитивного примера развития предприятия, работающего в сфере производства продукции для строительной отрасли, которое учитывает тенденции развития, можно привести «Группу компаний «Газосиликат». Организация на базе мониторинга рынка строительных материалов и перспектив развития строительной отрасли имеет четкую стратегию развития. Основной продукцией предприятия являются газосиликатные блоки, цветной кирпич и цветная тротуарная плитка. Эта продукция полностью соответствует современным технологиям и потребностям строительной отрасли с перспективой на достаточно долгосрочный период времени.

Для монолитного и панельного домостроения в качестве отделочных материалов требуется цветной кирпич, для стеновых проемов монолитных домов используются газосиликатные блоки. Прилегающие территории к новым домам оформляются цветной плиткой. Кроме того, компания строит коттеджи и офисные здания из собственных материалов по схеме «под ключ».

В качестве следующего примера возникающих при развитии отрасли проблем можно привести ситуацию с номенклатурой и сбытом продукции Могилевского завода «Электродвигатель». Он оказался в непростой экономической ситуации. Вследствие этого его вынуждены были присоединить к успешно работающему предприятию ОАО «Могилевлифтмаш». Причина спада в сбыте и производстве практически та же, что и у ОАО «Строммашина».

Основной продукцией предприятия являются электродвигатели. В прошлом столетии, когда энергоносители были достаточно дешевы, к электродвигателям не предъявлялись жесткие требования по энергосбережению. В настоящее время для снижения энергетических затрат в производстве и быту к оборудованию с электроприводами такие требования уже предъявляются. Им отвечают электродвигатели с регулируемой частотой вращения и мощностью. Они называются частотно-регулируемыми электроприводами (ЧРЭП).

Основой ЧРЭП по-прежнему остается электродвигатель, но он дополнен специальной системой управления. Спрос на эту продукцию растет и тенденция по прогнозам сохранится в ближайшей перспективе. Исходя из изложенного, целесообразно на специализированном предприятии по производству электродвигателей осваивать производство ЧРЭП широкой номенклатуры. Это должно входить в стратегические планы развития предприятия. Освоение произ-

водства ЧРЭП позволит развивать также научно-технический потенциал предприятия, что, в свою очередь, будет способствовать дальнейшему развитию возможностей предприятия и диверсификации продукции.

Освоение производства ЧРЭП позволит также усилить деятельность предприятия в рамках импортозамещения.

Еще одним примером эффективной деятельности предприятия на базе мониторинга развития отрасли и прогнозирования перспектив развития области использования выпускаемой продукции является ОАО «Могилевлифтмаш».

В связи с быстрым увеличением у населения количества автотранспорта возникают проблемы с местами для парковки автомобилей. Предприятие наладило производство автоматических парковочных систем. Фактически это грузовые лифты элеваторного типа, позволяющие на небольшой площади размещать автомобили в несколько ярусов по высоте.

ОАО «Могилевлифтмаш» также организовало выпуск эскалаторов, которые весьма востребованы в современных торгово-развлекательных центрах. Наблюдается устойчивая тенденция роста количества таких объектов, что обеспечивает спрос на указанную продукцию.

Вторым направлением повышения эффективности деятельности промышленных предприятий является модернизация выпускаемой продукции и освоение ее новых видов на базе внедрения новых перспективных материалов.

На современном этапе развития науки и техники серьезное развитие получило инновационное направление по созданию новых материалов и покрытий для промышленных изделий.

Республика Беларусь не имеет собственных рудных ресурсов металлов. Вместе с тем хорошо развита химическая промышленность. Замена металли-

ческих сплавов на современные полимерные композиционные материалы (КМ) в качестве конструкционных материалов для изделий является весьма перспективным направлением развития техники в мире и для Республики Беларусь.

Промышленное применение КМ с быстрым расширением областей внедрения началось с 70-х гг. прошлого столетия. Основными объектами применения КМ в то время были изделия ракетно-космического комплекса. Это позволило отработать технологии серийного производства и организовать изготовление соответствующего оборудования.

В настоящее время практически во всех ведущих областях техники наблюдается широкое внедрение КМ.

Композиты находят все большее применение благодаря уникальным свойствам: высокой прочности (400...1000 МПа) при низкой плотности (1,3...2 г/см³), высокой технологичности при приемлемом уровне цен. Промышленно освоены стеклопластики, углепластики, органопластики [1].

Для промышленной продукции общего назначения широкое применение получают стеклопластики, которые наиболее дешевы и соответствуют стоимости среднеуглеродистых сталей. Для продукции белорусских предприятий этот класс материалов наиболее подходит, так как исходные компоненты материала – стеклоткань и эпоксидные смолы – выпускаются в РБ [2].

Рассмотрим пример перспектив эффективного применения КМ на Могилевском вагоностроительном заводе (СЗАО «МВЗ») и Осиповичском вагоностроительном заводе.

Эти заводы относительно новые, производство на них начато в 2010–2013 гг.

В настоящее время СЗАО «МВЗ» выпускает товарные вагоны, полувагоны и хоппер-вагоны для сыпучих материалов. Осиповичский вагонострои-

тельный завод выпускает грузовые вагоны и танк-контейнеры из стали. Проектная мощность по указанным видам продукции на Осиповичском вагоностроительном заводе должна составлять 2000 танк-контейнеров и 2500 грузовых вагонов.

Эту номенклатуру продукции длительное время выпускает целый ряд стран, в том числе Российская Федерация. Конкуренция на данном сегменте рынка весьма высокая. Сбыт продукции белорусских заводов затруднен. В настоящее время СЗАО «МВЗ» и Осиповичский вагоностроительный заводы находятся в предбанкротном состоянии. Основная проблема заключается в низкой конкурентоспособности продукции из-за высокой себестоимости.

Проанализируем возможность снижения себестоимости танк-контейнеров на Осиповичском вагоностроительном заводе и организацию производства нового вида продукции – железнодорожных цистерн – на СЗАО «МВЗ» за счет освоения нового класса конструкционных материалов, полимерных композиционных, взамен традиционной стали.

Конструкционно танк-контейнеры и железнодорожные цистерны весьма близки. Следует отметить, что танк-контейнеры – это фактически цистерны, имеющие некоторые конструктивные особенности, позволяющие перевозить жидкие грузы без перегрузки при смене видов транспорта, например, железнодорожного на морской или иной другой вид.

В настоящее время в связи с планами расширения количества стран-поставщиков нефти на рынки Республики Беларусь указанный вид продукции приобретает особое значение.

Организация производства на СЗАО «МВЗ» в рамках диверсификации конкурентоспособной продукции – железнодорожных цистерн из стеклопла-

стиков – позволит улучшить финансовое состояние предприятия.

Технико-экономическим обоснованием инвестиционного проекта по производству железнодорожных цистерн из стеклопластика на СЗАО «МВЗ» показано, что при объеме производства 1 тыс. цистерн в год срок окупаемости проекта не превысит 2...3 года [3].

Технология изготовления из стеклопластиков цистерн методом спиральной намотки на станках с ЧПУ применяется также для производства танк-контейнеров на Осиповичском вагоностроительном заводе. Использование инновационной технологии спиральной намотки позволяет существенно снизить производственные затраты при обеспечении высокого качества продукции. Это будет способствовать росту конкурентоспособности продукции и обеспечит хороший сбыт как внутри Республики Беларусь, так и для экспорта.

Традиционные технологии изготовления железнодорожных цистерн и танк-контейнеров предполагают использование заготовок из листовой стали с последующей сваркой. Для изготовления заготовок цистерн в виде цилиндрических обечаек и полусферических днищ требуется энергоемкое кузнечно-прессовое оборудование. Сварка толстостенных заготовок также требует высоких энергетических затрат.

Цистерны из стеклопластиков изготавливаются на станках программных намоточных целиком за один установ. При этом энергетические затраты сокращаются в разы. Указанная технология является безотходной. Стоимость стеклопластиков приблизительно равна стоимости среднеуглеродистых сталей. Трудоемкость новой технологии существенно ниже традиционной, что обеспечивает снижение фонда оплаты труда. Для изготовления цистерн из стеклопластиков кроме станков СНП требуется технологическая оснастка в виде од-

норазовых песчано-полимерных водорастворимых оправок, стоимость которых не превышает стоимости оснастки для изготовления стальных цистерн.

Следует также учитывать, что исходные компоненты для стеклопластиков – стеклонити и эпоксидные смолы – в промышленных объемах выпускаются в Республике Беларусь в Полоцке и Светлогорске, что исключает закупки по импорту стального проката [3].

С учетом указанного себестоимость стеклопластиковых цистерн существенно ниже стальных, что и обеспечивает небольшие сроки окупаемости инвестиционных проектов по организации нового производства и высокую конкурентоспособность продукции.

Станки СНП для спиральной намотки в широком ассортименте выпускаются рядом фирм, в том числе в КНР и РФ, которые предлагают их по приемлемым ценам.

Следует отметить, что производство железнодорожных цистерн из стеклопластиков недавно начато в Российской Федерации на заводе «Уралкриомаш».

В последнее время существенно расширился ассортимент неармированных пластиков, стоимость которых снизилась и применение которых позволяет повысить потребительские свойства продукции и ее конкурентоспособность.

Примером применения таких материалов может быть предложение по использованию измельченного поликарбоната для снижения брака погружных насосов «Ручеек» на ОАО «Ольса» [4]. До настоящего времени электрическая часть погружного насоса заливалась компаундом, который состоял на 60 % из эпоксидной смолы ЭД-20 и на 40 % из кварцевого песка. Чтобы избежать электрического пробоя на корпус насоса, указанные материалы должны обладать высокими электроизоляционными свойствами. Удельная

электрическая прочность эпоксидной смолы составляет в среднем 20 Мв/м. Это высокий диэлектрический показатель. Кварцевый песок добавляют в компаунд для его удешевления. Однако в отдельных песчинках могут встречаться примеси токопроводящих материалов, что в 5 % случаев приводит к электрическому пробоям в готовом изделии и является причиной брака. При объеме производства насосов 500 тыс. в год потери по причине брака составляют около 250 тыс. долл. США.

Замена в составе компаунда песка на порошок поликарбоната позволит полностью исключить брак насосов по причине электрического пробоя компаунда.

Удельная электрическая прочность поликарбоната, так же как и смолы ЭД-20, составляет 20 Мв/м. Поликарбонат находит все более широкое применение для производства различных изделий, в частности, в электротехнической промышленности для производства деталей с высокими электроизоляционными свойствами, для изготовления парников, оптикопрозрачной кровли различных пешеходных переходов и т. д. Производство в больших объемах позволило снизить стоимость этого материала. Гранулы поликарбоната вторичной переработки всего на 10 % дороже кварцевого песка. Это делает его весьма перспективным материалом для производства компаундов, в том числе для использования в погружных насосах.

Третьим направлением повышения эффективности деятельности промышленных предприятий является внедрение экономически обоснованных инновационных технологий и оборудования.

Примером перспективности развития этого направления является, например, замена технологии изготовления из алюминиевых сплавов методом литья в кокиль корпусов погружных насосов на ОАО «Ольса» и корпусов электро-

двигателей на ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» на технологию порошковой металлургии.

Технология порошковой металлургии является практически безотходной, энергосберегающей, позволяющей почти в 3 раза уменьшить толщину стенки изделия и тем самым существенно сократить расход алюминиевого сплава.

Проведенными обоснованиями [4] показано, что вес корпуса погружного насоса может быть снижен практически вдвое, на 0,75 кг. Это позволит снизить себестоимость изделия почти на 15 %.

Следующим примером эффективного внедрения инновационных технологий взамен традиционных является использование установок для водобразивной резки металлов вместо механической или плазменной.

В статье «Повышение конкурентоспособности продукции на промышленном предприятии на примере ОАО «Ольса» [4] обоснована технико-экономическая эффективность внедрения водобразивных установок для заготовительного производства раскладных кроватей на ОАО «Ольса».

Длительное время резка стальных труб диаметром 18 мм, которые являются каркасом раскладной кровати, осуществлялась на гильотинных установках, имеющих низкую производительность и высокие энергозатраты. В настоящее время эти операции выполняются на автоматизированном станке с механической резкой заготовок дисковой фрезой. Вместе с тем внедрение портальной установки гидроабразивной резки KNUTH Water-Jet 2060 позволило бы существенно повысить производительность и качество заготовительных операций. Окупаемость такого инвестиционного проекта составляет 2...2,5 года.

Развитие получают также технологии 3D-печати. Преимущество таких технологий заключается прежде всего в

том, что для быстрого перехода на новые виды продукции не требуется разработки и изготовления дорогостоящей технологической оснастки. Для перехода на новую продукцию достаточно изменения программы системы управления оборудования. Такие возможности приобретают особое значение в условиях развития рынка и повышения требований к конкурентоспособности продукции.

Технологии 3D-печати быстро развиваются, область их применения расширяется. Если на первом этапе с применением этих технологий изготавливались только изделия из пластиков, то теперь появились технологии 3D-печати металлических конструкций. В основе их лежит нанесение по заданной программе порошка металлов, формирующей конструкцию изделия, с последующим спеканием лазерным лучом.

Четвертым направлением повышения эффективности деятельности промышленных предприятий является использование новых конструктивных решений для снижения себестоимости продукции.

Внедрение новых прогрессивных конструкционных материалов, технологий и оборудования, некоторые из которых представлены ранее, неизбежно приводит к необходимости совершенствования конструкции изделия. Это нужно учитывать при разработке и обосновании инвестиционных проектов.

Так, освоение новых полимерных композиционных материалов требует специальных приемов конструирования изделий. Дело в том, что классические металлические сплавы изготавливаются до проектирования из них изделия. Они обладают постоянными изотропными физико-механическими свойствами во всех направлениях.

Создание изделий из композиционных материалов – более сложный процесс. Этапы проектирования струк-

туры материала и конструкции изделия совмещены. Готовый материал обладает высокой анизотропией свойств: высокими прочностными характеристиками по направлениям армирования и на порядок более низкой прочностью поперек армирования и на смятие.

При внедрении изделий, изготавливаемых методом порошковой металлургии, появляется возможность варьировать свойствами готового материала за счет подбора состава исходных порошков.

Еще одним инновационным подходом при конструировании изделий или их модернизации является применение функционально-стоимостного анализа.

При модернизации изделий или разработке новой продукции конструктор чаще всего руководствуется накопленным опытом и традициями. Это является психологическим барьером при создании инновационной продукции.

Использование функционально-стоимостного подхода позволяет удешевить продукцию до 20 %.

Сущность подхода заключается в том, что первоначально объект исследования представляется как модель, состоящая из основных и вспомогательных функций будущего или модернизируемого изделия, затем оценивается значимость и полезность каждой функции при выполнении им в период эксплуатации требований потребителя к изделию. Далее делается стоимостная оценка каждой функции и проводится оптимизация функциональной схемы по выбранным критериям. На этой части разработки может осуществляться несколько итераций. В дальнейшем производится переход от оптимизированной функциональной структуры изделия к реальным конструктивно-технологическим решениям по обеспечению функций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / Под ред. А. А. Берлина – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Профессия, 2011.
2. **Токменинов, К. А.** Эффективность освоения полимерных композиционных материалов в промышленности / К. А. Токменинов // *Russian Economic Bulletin*. – 2018. – № 3.
3. **Токменинов, К. А.** Перспективы освоения полимерных композиционных материалов в Республике Беларусь / К. А. Токменинов // *Вест. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2018. – № 3.
4. **Токменинов, К. А.** Повышение конкурентоспособности продукции на промышленном предприятии на примере ОАО «Ольса»/ К. А. Токменинов // *Вест. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2019. – № 3.

Статья сдана в редакцию 3 марта 2020 года

Константин Александрович Токменинов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: KTokmeninov@gmail.com.

Konstantin Alexandrovich Tokmeninov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: KTokmeninov@gmail.com.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2(67) 2020

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

Е. С. Лустенкова

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212000, г. Могилев. Телефон: 23-00-07, e-mail: bru@bru.mogilev.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 15,35. Уч.-изд. л. 8,25. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.