

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

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

Периодичность – 4 раза в год

2(47) 2015

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ВОЕВИДКО И. В., ЧУДЫК И. И. Прогнозирование искривления скважин при неориентированном бурении с использованием гидравлических забойных двигателей.....	6
ЛЕСКОВЕЦ И. В., БЕРЕСТОВ Е. И., СМОЛЯР А. П. Влияние параметров профиля отвала бульдозера на величины сил сопротивления копанию	12
ЛИННИК Д. А. Теоретические исследования колебаний масс колесного трактора с моделированием случайных возмущений на ПЭВМ	23
ЛОВШЕНКО Ф. Г., ЛОВШЕНКО Г. Ф. Анализ превращений, протекающих при механическом легировании многокомпонентных систем на основе железа	34
МАСЛОВ Б. Г., ВЫБОРНОВ А. П. Контрольно-измерительные материалы для количественной оценки знаний, умений и навыков технических специалистов в области машиностроения	44
МЕЛЬНИК М. В. Совершенствование обучения учащихся рабочей профессии сварщик с применением сварочных тренажеров (имитаторов).....	48

САЗОНОВ И. С., ПРУДНИКОВ А. П., ЛУСТЕНКОВ М. Е., ФИТЦОВА Е. С. Исследование износа составных роликов в передачах с промежуточными телами качения	58
ТАРАСИК В. П., ГОРБАТЕНКО Н. Н., ПЛЯКИН Р. В., САВИЦКИЙ В. С. Мехатронная система автома- тического управления гидромеханической переда- чей мобильных машин	68
ТАРАСИК В. П., РОМАНОВИЧ Ю. С. Моделиро- вание переключения передач автомобиля с гидроме- ханической трансмиссией	81
ЯКУБОВИЧ Д. И., ЛISOVAY И. А., ЛУЖАНСКАЯ И. М. Снижение неоднородности сварных швов и повы- шение их механических характеристик при исполь- зовании модифицированных порошковых материа- лов в покрытии электродов.....	95

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ВИШНЕРЕВСКИЙ В. Т., СТАСЕНКО И. С., ЛЕНЕВСКИЙ Г. С., ЛЕКАРЕВА А. В. Моделиро- вание электроприводов, содержащих линейный эле- мент с распределенными параметрами в механичес- кой подсистеме	103
КОВАЛЬ А. С., ЛАГУН Н. С. Передаточные функ- ции механической подсистемы редукторного элект- ропривода лифтов	112

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

ГИЧКО В. В. Расчет устойчивости гибких железобе- тонных стоек деформационным методом	119
--	-----

ФИЗИКА

ЛЯПИН А. И. Пространство и время в физической терминологии	128
--	-----

**ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ**

ФАДЬКИН Г. Н., ВИНОГРАДОВ Д. В., ЩУР А. В.

Влияние нанокристаллического порошка железа на
выход посадочного материала сосны обыкновенной,
пригодного для механизированной посадки 136

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПУЗАНОВА Т. В., КРУПКИНА А. В. Автоматизация

оперативно-производственного планирования в малом
бизнесе 143

- 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

VOIEVIDKO I. V., CHUDYK I. I. Forecasting of well deviation in non-oriented well-boring with hydraulic downhole drilling motors	6
LESKOVETS I. V., BERESTOV Y. I., SMOLYAR A. P. Impact of parameters of the bulldozer blade profile on the magnitudes of digging resistance	12
LINNIK D. A. Theoretical research of mass fluctuations of wheeled tractors with pc modeling of random disturbances	23
LOVSHENKO F. G., LOVSHENKO G. F. Analysis of transformations occurring during mechanical alloying of iron-based multicomponent systems	34
MASLOV B. G., VYBORNOV A. P. Validation tests for assessing machinery specialists' qualification	44
MELNIK M. V. Improvement of welding students training with the use of welding simulators (imitators).....	48
SAZONOV I. S., PRUDNIKOV A. P., LUSTENKOV M. Y., FITTSOVA E. S. Research of wear of composite rollers in transmissions with intermediate rolling bodies	58
TARASIK V. P., GORBATENKO N. N., PLIAKIN R. V., SAVITSKY V. S. Mechatronic system for automatic control of mobile machines hydromechanical transmission	68
TARASIK V. P., ROMANOVICH Y. S. Modeling of gear shift of vehicles with hydromechanical transmission	81
YAKUBOVICH D. I., LISOVAYA I. A., LUZHANSKAYA I. M. Decrease in non-homogeneity of welded joints and increase of their mechanical characteristics when using modified powder materials in electrode coating.....	95

ELECTRICAL ENGINEERING

VISHNEREVSKY, STASENKO I. S., LENEVSKY G. S., LEKAREVA A. V. Simulation of electric drives containing a linear element with distributed parameters in the mechanical subsystem	103
---	-----

KOVAL A. S., LAGUN N. S. Transfer functions of the mechanical subsystem of the elevator reduction electric drive	112
---	-----

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

GICHKO V. V. Calculation of flexible reinforced-concrete poles stability by the deformation method	119
---	-----

PHYSICS

LYAPIN A. I. Space and time in physical terminology	128
--	-----

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY

FADKIN G. N., VINOGRADOV D. V., SHCHUR A. V. Effect of iron nanocrystalline powder on the yield of scots pine planting material suitable for mechanized planting	136
---	-----

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

PUZANOVA T. V., KRUPKINA A. V. Automation of operational production planning in small-scale business	143
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.43.92

И. В. Воевидко, И. И. Чудык

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ СКВАЖИН ПРИ НЕОРИЕНТИРОВАННОМ БУРЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

UDC 622.43.92

I. V. Voievidko, I. I. Chudyk

FORECASTING OF WELL DEVIATION IN NON-ORIENTED WELL-BORING WITH HYDRAULIC DOWNHOLE DRILLING MOTORS CALCULATION OF CENTRIFUGAL MAGNETIC DEHUMIDIFIERS

Аннотация

Дан краткий анализ разработанных аналитических моделей движения долота при бурении в анизотропной среде и указаны их недостатки. Представлено уравнение для расчёта интенсивности искривления ствола скважины при бурении в сложных геологических условиях гидравлическими забойными двигателями. Изложена суть методики прогнозирования интенсивности искривления скважин. Предложен критерий оценки точности проводки наклонно направленных скважин. Достоверность разработанной методики подтверждена результатами её промышленной апробации.

Ключевые слова:

математическая модель, искривление скважины, отклоняющий фактор, зенитный угол, траектория скважины, круг допуска, план траектории скважины.

Abstract

The developed analytical models of the motion of a boring head during drilling in an anisotropic medium are analyzed briefly and their shortcomings are provided. The equation is presented which calculates the intensity of deviation of a wellbore hole in drilling by hydraulic downhole motors in difficult geological conditions. The essence of the method of forecasting the intensity of wells deviation is given. The criterion for evaluating the accuracy of performing directional drilling of slant wells is provided. The reliability of the proposed method is confirmed by the results of its industrial testing.

Key words:

mathematical model, well deviation, deflecting factor, inclination angle, well trajectory, target area, plan of well trajectory.

Направленное бурение скважин предусматривает реализацию мероприятий естественного и искусственного их искривления. При этом используются определённые способы и технические средства во взаимосвязи с конкретными геологическими условиями бурения.

В процессе бурения, отклоняясь под влиянием геологических факторов от расчетной траектории, скважины могут не вскрыть нефтегазоносные слои и, как следствие, не выполнить свои проектные задачи. Однако накопленный фактический материал по естественно-

му искривлению, а также разработанные теоретические положения процесса искусственного искривления ствола скважины позволили установить ряд общих закономерностей. В то же время во многих случаях проектная траектория ствола скважины не совпадает с фактической, что вызвано определенными факторами, которые не всегда учитываются в математических моделях пространственного формирования ствола скважины [1–4].

Известны уравнения, описывающие темп искривления скважины при бурении в анизотропной среде неориентированными компоновками низа буровой колонны (КНБК), использующими силы гравитации [5–8].

Все математические модели в качестве причины искривления принимают образование траекторного угла – угла между касательной к оси скважины и направлением вектора скорости бурения. Однако указанные математические модели или не являются универсальными, или предусматривают использование несовершенных расчетных схем, допускающих целый ряд не всегда обоснованных упрощений.

Практика бурения направленных скважин в сложных горно-геологи-

ческих условиях показывает, что успешная проводка скважин без учёта основных закономерностей их искривления исключена [9, 10]. Установить закономерности процесса искривления в конкретных геологических условиях представляется возможным путем изучения необходимого промыслового материала для выявления качественной причины этого процесса. Однако использование несовершенных математических моделей искривления скважин не позволяет достоверно оценить этот процесс количественно, что приводит к значительным отклонениям проектного профиля от фактического [11].

В статье отображены результаты теоретических исследований в плане разработки математической модели искривления ствола скважины с учётом специфики условий бурения, а также основные подходы к методике расчета его пространственного положения.

В результате изучения особенностей работы гидравлических забойных двигателей и низа буровой колонны в сложных геологических условиях получены следующие уравнения для расчёта интенсивности искривления ствола скважины:

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{2}{L} \cdot \varphi_{\alpha} = \frac{2}{L} \cdot \left[\left(\beta_o + \theta + K \cdot \frac{F_{OT}}{F_{OC}} \right) \cos \beta_n + \frac{h}{2} \cdot \sin 2\omega \cdot \cos \sigma \right] = \frac{2}{L} \cdot (\varphi_{T\alpha} + \varphi_{r\alpha}); \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{2}{L} \cdot \Phi_{\varphi} = \frac{2}{L \cdot \sin \alpha} \cdot \left[\left(\beta_o + \theta + K \cdot \frac{F_{OT}}{F_{OT}} \right) \cdot \sin \beta_n + \frac{h}{2} \cdot \sin 2\omega \cdot \sin \sigma \right] = \frac{2}{L} \cdot (\Phi_{T\varphi} + \Phi_{r\varphi}), \quad (2)$$

где L – длина направляющего участка от долота до первой точки контакта со стенкой скважины; β_o – угол несоосности КНБК; θ – поворот оси долота под действием приложенных нагрузок; K – коэффициент фрезерующей способности долота; F_{OT} , F_{OC} – отклоняющая сила и осевая нагрузка на долото соответственно; β_n – угол поворота плоскости изгиба компоновки под действием

реактивного момента забойного двигателя; h – буровой индекс анизотропии; ω – угол встречи долота с плоскостью пласта геологической структуры; σ – угол между апсидальной плоскостью и плоскостью действия отклоняющего фактора анизотропии.

Как видно из (1) и (2), темпы изменения зенитного α и азимутального φ углов зависят от алгебраической суммы

составляющих технико-технологического отклоняющего фактора Φ_{Ta} и $\Phi_{T\phi}$, а также от составляющих отклоняющего фактора анизотропной среды Φ_{Ta} и $\Phi_{T\phi}$. Φ_a и Φ_ϕ представляют собой траекторные углы или, другими словами, полные отклоняющие факторы, определяющие характер соответственно зенитного и азимутального искривлений.

При $\Phi_a > 0$ и $\Phi_\phi > 0$ $\frac{d\alpha}{ds} > 0$, $\frac{d\phi}{ds} > 0$, а

при $\Phi_a < 0$ и $\Phi_\phi < 0$ $\frac{d\alpha}{ds} < 0$, $\frac{d\phi}{ds} < 0$.

При нулевом значении одного из отклоняющих факторов происходит стабилизация соответствующего угла.

Анализ уравнений (1) и (2) показал, что составляющие технико-технологического фактора β_0 и θ и функциональный показатель F_{OT} характеризуют КНБК, в состав которой входит отклонитель любой конструкции. В данном случае к углу β_n следует добавить угол установки отклонителя. Здесь необходимо отметить, что величина угла β_n рассчитывается в соответствии с разработанной методикой [12]. Таким образом, полученные уравнения могут быть также использованы при расчете траектории наклонно направленной скважины в случае бурения КНБК с отклонителями различных конструкций, что расширяет возможности их применения.

Из уравнений (1) и (2) также следует, что составляющие отклоняющего фактора анизотропной геологической среды Φ_{Ta} и $\Phi_{T\phi}$ зависят, в первую очередь, от величины бурового индекса анизотропии h и числовых значений геометрических критериев ω и σ , что подтверждает влияние отклоняющего фактора неоднородной геологической структуры. При увеличении угла ω величины Φ_{Ta} и $\Phi_{T\phi}$ возрастают. При увеличении угла σ составляющая Φ_{Ta} уменьшается, а $\Phi_{T\phi}$, наоборот, возрастает.

Точность реализации проектного профиля в значительной мере зависит от его формы. Наиболее рациональным

следует считать профиль, близкий к профилю естественного искривления в конкретных геологических условиях. Поэтому тип профиля скважины выбирают, прежде всего, на основе анализа геологических условий бурения исходя из необходимости обеспечения высокого качества скважины как объекта последующей эксплуатации, а также с учётом технических возможностей, экономической эффективности и безаварийных условий её бурения и крепления.

При проводке наклонных скважин в условиях, когда геологические факторы имеют значительное влияние на траекторию скважины, используют профили пространственного типа, предполагающие участки с естественным изменением зенитного угла и азимута. При этом проектный профиль должен быть максимально приближен к естественным условиям искривления в рамках допустимых величин.

В процессе бурения наклонных скважин отклоняющие факторы геологического характера действуют независимо от технико-технологических факторов искривления и могут в соответствии с направлением действия или усиливать их влияние на процесс искривления скважин, или, наоборот, ослаблять. Поэтому исходя из принципа суперпозиции представляется возможным отдельно рассчитывать интенсивность искривления скважины под действием факторов различного характера.

Исходя из вышеуказанного вполне закономерно сделать вывод о целесообразности отдельного расчёта формирования траектории ствола скважины под действием исключительно фактора искривления геологического характера, что даст возможность проанализировать процесс её естественного искривления. Далее необходимо провести расчёт траектории скважины под комплексным воздействием факторов как геологического, так и технико-технологического характера.

При расчёте искривления скважины под действием только факторов геологического характера следует использовать следующие уравнения:

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{h}{L} \cdot \sin 2\omega \cdot \cos \sigma; \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{h}{L} \cdot \sin 2\omega \cdot \frac{\sin \sigma}{\sin \alpha}. \quad (4)$$

При уточнённом расчете траектории скважины с учетом всех факторов искривления необходимо применять формулы (1) и (2).

На рис. 1 показан пример проектных планов траектории скважины под действием геологического фактора и

под комплексным влиянием факторов геологического и технико-технологического характера.

Профиль указанной скважины, проводку которой предусмотрено осуществлять с использованием закономерностей естественного искривления, состоит из четырёх участков: условно вертикального (0...300 м), перехода на расчетный азимут и набора зенитного угла (300...600 м), прямолинейно-наклонного со стабилизацией зенитного и азимутальных углов (600...1600 м), естественного искривления с прогнозированным изменением зенитного угла и азимута на конечном этапе бурения (1600...3000 м).

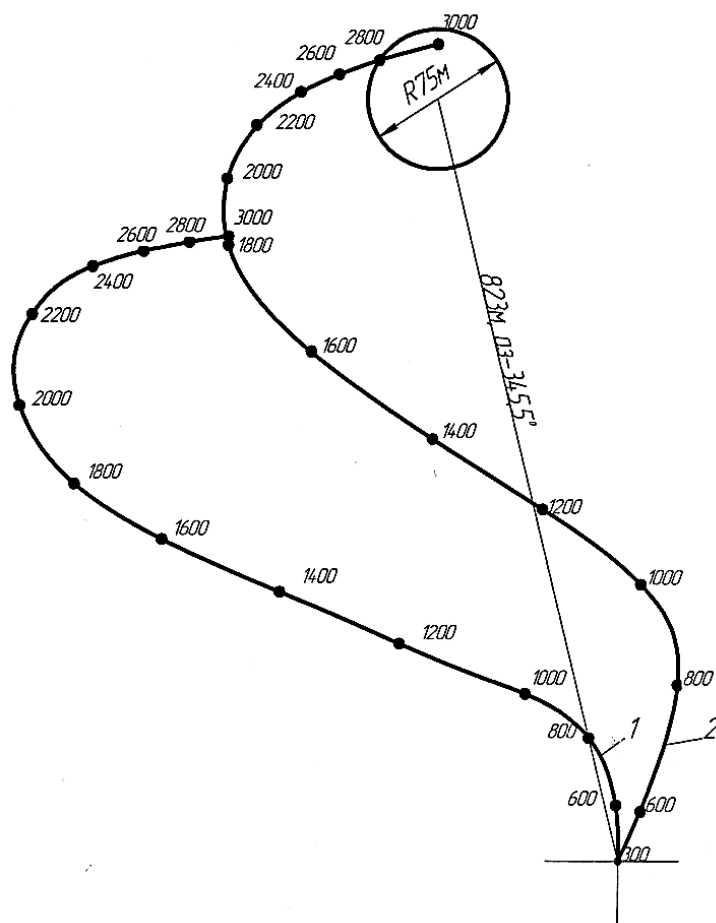


Рис. 1. Проектный план траектории скважины: 1 – при искривлении под действием в основном геологического фактора; 2 – при искривлении под комплексным влиянием факторов геологического и технического характера

Из рис. 1 видно, что естественные факторы искривления способствуют проводке наклонной скважины в заданном направлении, однако конечная точка профиля на глубине 3000 м находится на расстоянии приблизительно 250 м от центра круга допуска. Проектный план скважины при искривлении под комплексным влиянием факторов показывает, что конечная точка её траектории попала в круг допуска и располагается возле его границы. Для более точного попадания в круг допуска необходимо уменьшить зенитный угол скважины при бурении с отклонителем на втором участке с 33 до 31° при сохранении прежнего азимутального направления.

Успех направленного бурения в значительной степени зависит от точности реализации профиля скважины в процессе бурения, что, в свою очередь, констатирует достоверность методики его прогнозирования.

Для оценки точности проводки наклонной скважины по всей её длине предлагается следующий критерий:

$$K_m = \frac{\sum_{i=0}^n K_{Ti}}{n}, \quad (5)$$

где K_{Ti} – коэффициент точности проводки наклонной скважины на текущей глубине, $K_{Ti} = \frac{r_{\text{фи}}}{r_{\text{ди}}}$; n – количество промежуточных коэффициентов.

Промышленная апробация методики прогнозирования искривления скважин проводилась при бурении скважины 12-Лопушна в сложных горно-геологических условиях Карпат.

На рис. 2 представлены проектный и фактический планы траектории указанной наклонной скважины, анализ которых показал, что максимальное отклонение оси её ствола от проектного положения составило 24,3 м, т. е. почти вдвое меньше допустимого. В данном случае коэффициент точности проводки скважины $K_T = 0,46$, что свидетельствует о её вполне удовлетворительном качестве.

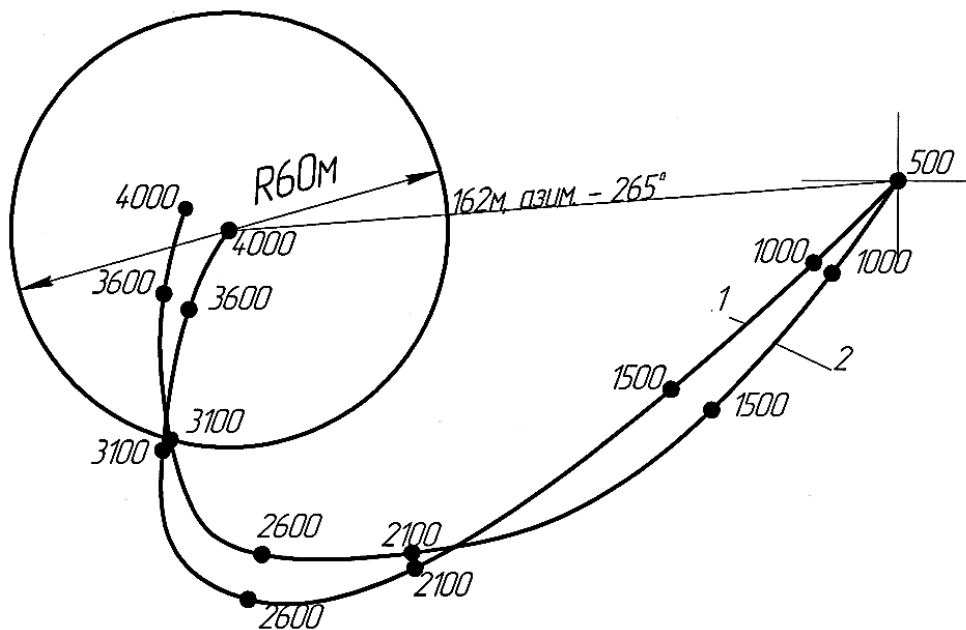


Рис. 2. Планы траектории скважины 12-Лопушна: 1 – проектный; 2 – фактический

Таким образом, разработана математическая модель пространственного искривления ствола наклонной скважины при бурении в сложных геологических условиях неориентированными КНБК с учетом специфики условий бурения, позволяющая прогнозировать интенсивность изменения ее зенитного

угла и азимута как функцию отклоняющих факторов. На основе вышеуказанной модели предложена методика расчета и прогнозирования искривления наклонных скважин, которая достоверно описывает процесс её пространственного формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурение наклонных и горизонтальных скважин / А. Г. Калинин [и др.]. – М. : Недра, 1997. – 650 с.
2. Профили направленных скважин и компоновки низа буровой колонны / А. Г. Калинин [и др.]. – М. : Недра, 1995. – 305 с.
3. Управление искривлением наклонных скважин в Западной Сибири / Л. Я. Сушон [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 124 с.
4. **Воевидко, И. В.** Неориентированные компоновки повышенной активности на базе винтовых двигателей для борьбы с искривлением скважин / И. В. Воевидко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2013. – № 3. – С. 4–6.
5. **Вудс, Г.** Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – М. : Гостоптехиздат, 1960. – 124 с.
6. **Гулизаде, М. П.** Закономерности искривления наклонных скважин и критерии стабилизации угла наклона / М. П. Гулизаде, Л. Я. Кауфман, Л. Я. Сушон // Нефтяное хозяйство. – 1972. – № 3. – С. 1–4.
7. **Гулизаде, М. П.** Расчёт темпа пространственного искривления наклонных скважин при бурении неориентированными КНБК / М. П. Гулизаде, О. К. Мемедбеков // Теория и практика бурения наклонных скважин. – Баку : АЗИНЕФТЕХИМА, 1982. – Вып. 1. – 63 с.
8. **Тимофеев, Н. С.** Формула темпа приращения кривизны для расчета профиля практически вертикальных скважин / Н. С. Тимофеев, В. О. Белоруссов, О. Ю. Бергштейн // Нефтяное хозяйство. – 1968. – № 8. – С. 32–34.
9. **Белорусов, В. О.** Прогнозирование и расчёт естественного искривления скважин : справ. пособие / В. О. Белоруссов, Т. М. Боднарук. – М. : Недра, 1988. – 175 с.
10. Использование естественного искривления при проводке наклонно направленных скважин / Т. М. Боднарук [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 1981. – № 3. – С. 14–16.
11. **Калинин, А. Г.** Бурение наклонных скважин : справочник / А. Г. Калинин, Н. А. Григорян, Б. З. Султанов. – М. : Недра, 1990. – 348 с.
12. **Гулизаде, М. П.** Регулирование азимутального искривления при бурении наклонно направленных скважин с применением неориентированных КНБК / М. П. Гулизаде, О. К. Мемедбеков // Обзорная инфор. Сер. Строительство скважин. – 1989. – Вып. 1. – 63 с.

Статья сдана в редакцию 26 декабря 2014 года

Игорь Владимирович Воевидко, д-р техн. наук, проф., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. E-mail: voievidko@gmail.com.

Игорь Иванович Чудык, д-р техн. наук, проф., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. E-mail: chudoman@ukr.net.

Igor Vladimirovich Voievidko, DSc (Engineering), Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. E-mail: voievidko@gmail.com.

Igor Ivanovich Chudyk, DSc (Engineering), Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. E-mail: chudoman@ukr.net.

УДК 621.87:658.512.011.56

И. В. Лесковец, Е. И. Берестов, А. П. Смоляр

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА НА ВЕЛИЧИНЫ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ

UDC 621.87:658.512.011.56

I. V. Leskovets, Y. I. Berestov, A. P. Smolyar

IMPACT OF PARAMETERS OF THE BULLDOZER BLADE PROFILE ON THE MAGNITUDES OF DIGGING RESISTANCE

Аннотация

Отмечается, что существующая методика определения сил сопротивления копанию отвалом бульдозера не позволяет учитывать влияние параметров профиля отвала на величины этих сил. Обозначено, что современные научные исследования дают возможность теоретическим путем установить степень влияния на величины сил сопротивления копанию параметров профиля отвала. Представлена установка, способствующая проведению экспериментов для определения сил сопротивления копанию отвалом бульдозера, описана методика и приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова:

бульдозер, рабочее оборудование, отвал, силы сопротивления копанию, экспериментальные исследования.

Abstract

The paper states that current techniques for determining resistance forces when digging with a bulldozer blade do not take into account the effect of parameters of a blade profile on the magnitudes of these forces. It is noted that modern scientific studies allow establishing theoretically the degree of impact of blade profile parameters on values of digging resistance forces. The installation is presented for carrying out experiments, which determine resistance forces to digging with a bulldozer blade, and methods of doing experiments and their results are described.

Key words:

bulldozer, operating equipment, blade, digging resistance forces, experimental research.

Введение

В области проектирования машин для земляных работ в настоящее время сложились представления о том, что в процессе разработки грунта преодолевается комплексное сопротивление, называемое сопротивлением копанию. Вскрыты закономерности в определении сопротивлений копанию [1–3] как суммы составляющих трех основных частей: сопротивление грунта резанию; сопротивление перемещению призмы волочения; сопротивление заполнению

ковша (у ковшовых машин) либо сопротивление перемещению стружки вверх по отвалу или сквозь призму волочения (для машин с отвальным рабочим органом). Хотя эта методика учеными подвергалась критике, однако и в настоящее время она используется для практических расчетов.

Многими исследователями, в частности Н. Г. Домбровским [4], Ю. А. Ветровым [5], установлено, что сила сопротивления резанию является наиболее весомой составляющей и ко-

леблется от 42 до 83 % в сумме сопротивлений копанию при применении различных рабочих органов в разных условиях. На основании экспериментальных данных рекомендуется устанавливать значения сил сопротивления резанию и сопротивления копанию, предлагается использование расчетных зависимостей с учетом коэффициента, характеризующего удельное сопротивление копанию. Отмечается важность **уточнения определения величин и закономерностей сил сопротивления резанию и копанию, что должно в наибольшей степени способствовать усовершенствованию и повышению эффективности землеройных машин.**

Ряд исследований, проведенных современными учеными [6, 7], посвященных определению величин сил сопротивления копанию грунта, позволяет установить степень влияния параметров профиля отвала на эти силы и разработать специализированное программное обеспечение.

В статье обозначены цели и задачи исследования, представлена экспериментальная установка, изложена методика исследований, определено необходимое число опытов. Приведено описание проведения экспериментальных и теоретических исследований, выполнен их анализ.

Цели и задачи исследования

Целью экспериментальных исследований является получение численных значений сил сопротивления копанию, сопоставление их с теоретическими; определение влияния параметров отвала на величины сил сопротивления копанию на разных стадиях копания.

Задачи экспериментальных исследований:

- получение численных значений горизонтальной составляющей сопротивления копанию, а также интенсивности нарастания сил по мере роста при-

мы волочения для отвалов с разными параметрами;

- сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими;

- оценка адекватности теоретических исследований.

Установка для экспериментальных исследований

Эксперименты проводились в грунтовом канале Белорусско-Российского университета. Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: грунтового канала, тележки с рабочим органом, тяговой станции, тензоизмерительного комплекта.

Грунтовый канал представляет собой емкость прямоугольного сечения высотой 1,2 м, шириной 1 м и длиной 8 м, заполненную песком. В верхней части канала имеются направляющие для установки тензометрической тележки.

Привод тележки осуществляется от электрического двигателя через редуктор с переменными передаточными числами посредством канатной тяги. Скорость передвижения тележки изменяется переключением редуктора.

Для устранения возможных перекосов при неравномерно распределенной нагрузке тележка приводится в движение через две ветви каната, прикрепленные симметрично относительно ее продольной оси. Рабочее движение тележки производится следующим образом: при включении двигателя 6 через редуктор 7 в движение приводится барабан 2 (рис. 1). При вращении барабана 2 на него навивается ветвь 3 и сбегает ветвь каната 5. Реверс осуществляется посредством смены направления вращения ротора двигателя. При этом барабан вращается в противоположную сторону, и теперь на него набегает ветвь каната 5 и сбегает ветвь каната 3. Тензометрическая тележка будет двигаться в противоположную сторону.

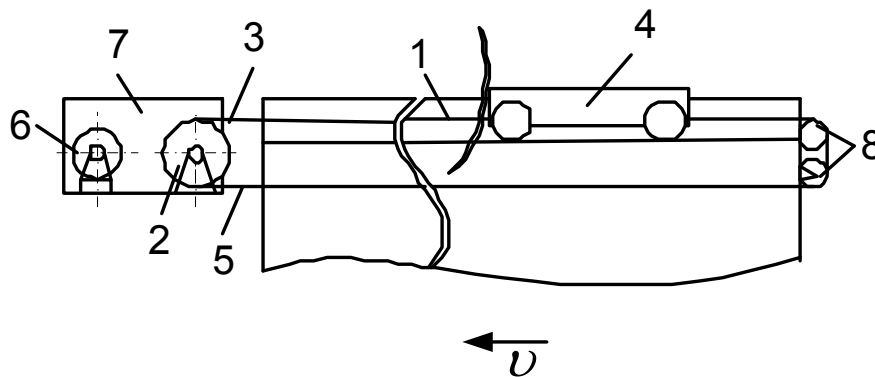


Рис. 1. Схема запасовки канатов: 1 – канат; 2 – барабан; 3 – ветвь набегающая; 4 – тележка; 5 – ветвь сбегающая; 6 – двигатель; 7 – коробка передач автомобильная; 8 – блоки неподвижные; v – направление рабочего движения

Главным элементом установки является тензометрическая тележка, общий вид которой представлен на рис. 2. Составляет тележка из двух основных частей – внутренней тензометрической 2 и внешней 1 рам. Для измерения горизонтальной составляющей сопротивления копания используется свободная под-

веска тензометрической рамы 2 с внешней рамой 1. Усилия определяются в связях, накладываемых на раму, тензометрическим датчиком (не показан) и тензометрическим преобразователем 3. В местах связей трение сведено к минимуму за счет применения подшипников качения.

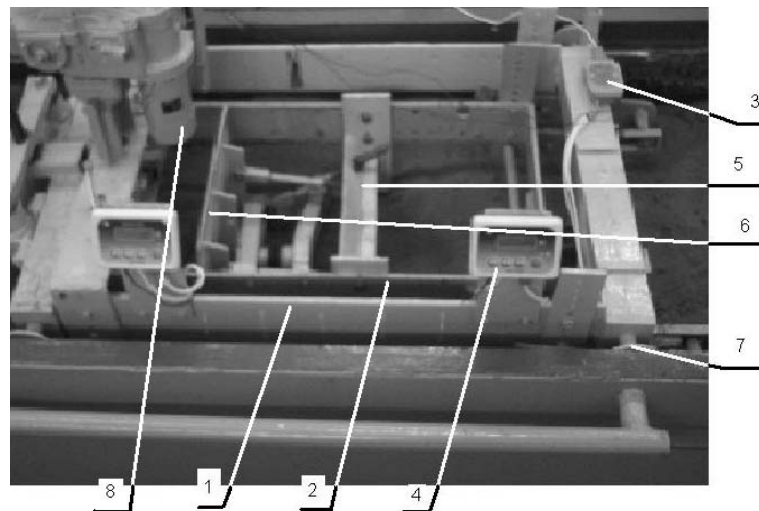


Рис. 2. Общий вид тензометрической тележки: 1 – внешняя рама; 2 – внутренняя рама; 3 – тензопреобразователь; 4 – табло регистрации усилий; 5 – универсальная рама; 6 – отвал; 7 – опорные ролики; 8 – редуктор

Внешняя рама 1 установлена на опорных роликах 7 и подсоединена к тяговой станции. На этой раме размещена универсальная рама 5, к которой прикреплен отвал 6. Для возможности

регулирования толщины стружки на раме 1 дополнительно установлен редуктор 8, кинематически связанный с внутренней рамой 2. Привод редуктора осуществляется шкивом.

На рис. 3 изображена схема профиля отвала с параметрами, оказывающими влияние на силы сопротивления копанию.

В табл. 1 представлены значения

параметров профиля отвала для бульдозера «БЕЛАРУС-1502» и рекомендованные в результате проведения теоретических расчетов.

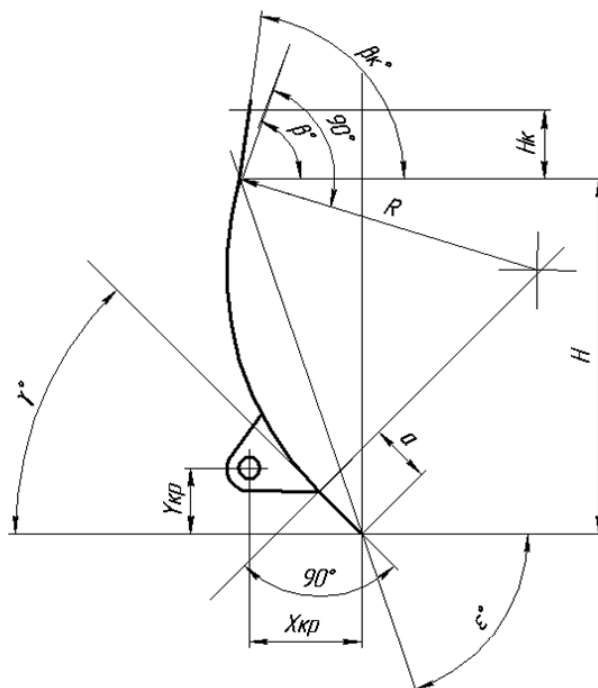


Рис. 3. Параметры профиля отвала

Табл. 1. Параметры профилей отвалов

Наименование параметра	Единица измерения	«БЕЛАРУС-1502»	Рекомендуемый параметр
Высота отвала Н	м	1,028	1,028
Высота козырька Н _к	м	0,205	0,205
Точка крепления Х _{кр}	м	0,446	0,446
Точка крепления У _{кр}	м	0,254	0,254
Длина прямолинейной части отвала а	м	0,323	0,200
Ширина отвала В	м	3,630	3,630
Радиус кривизны отвала м	м	0,783	1,2
β	град	69,8	69,8
β _к	град	95	95
ε	град	71,3	71
γ	град	50	53

Для экспериментальных исследований изготовлены модели отвалов с

параметрами, применяемыми на практике и рекомендованными на основе

теоретических исследований. Модели отвалов продемонстрированы на рис. 4. Масштабный коэффициент для физических моделей равен 1:7.

Рабочий орган позволяет изменять толщину стружки путем вращения шкива редуктора 8 (см. рис. 2).

Запись результатов измерения осуществляется следующим образом. Сигналы с тензодатчика передаются на тензометрический преобразователь 3 (см. рис. 2) и далее через разъем RS 232

порта на персональный компьютер, на котором установлена программа обработки поступающих цифровых сигналов (рис. 5). Программа обеспечивает конвертацию цифрового сигнала в файл формата MS Excel с записью числовых значений времени и усилия на датчике в момент его опроса. Таким образом, имеется возможность сохранения на диске компьютера файлов со значениями времени и горизонтальной составляющей процесса копания грунта.

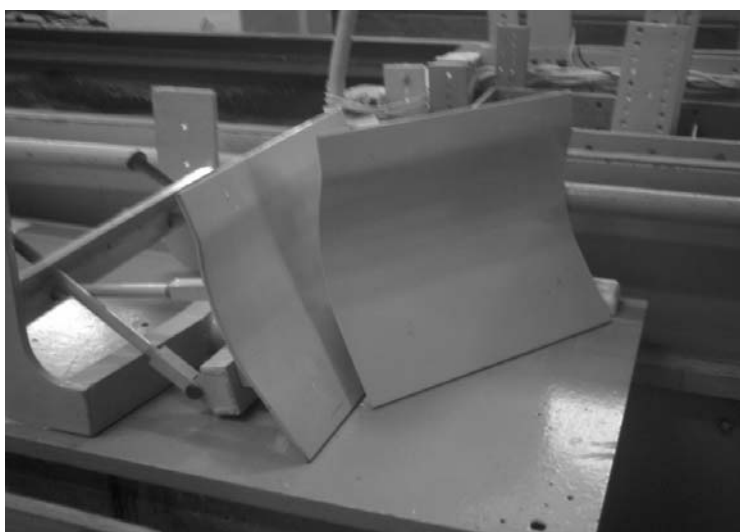


Рис. 4. Модели отвалов с универсальной рамой



Рис. 5. Тензометрическая тележка с компьютером

Методика проведения лабораторных исследований

При лабораторных исследованиях с целью сокращения времени подготовки опытов и обеспечения по возможности идентичных условий при их повторении применялась методика физического моделирования, разработанная В. И. Баловневым [8, 9].

Для сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими, полученными с помощью программного обеспечения, использовались реальные физико-механические свойства грунта в канале и реальные размеры исследуемой модели.

Основой для получения модели грунта служил мелкозернистый речной песок, размер фракций которого не превышал 2 мм. Предварительно увлажненный песок перекапывался и уплотнялся с помощью электрической виброплощадки. В качестве показателя, определяющего подобие грунта по прочности, использовалось число ударов ударника ДорНИИ. Параметры ударника были изменены в соответствии с рекомендациями, изложенными в [10, 8]. Масштабный коэффициент $k = 7$. Модель грунта приготавливалась на 6 ударов, что соответствует II категории грунта.

Опыты проводились в следующем порядке. Перед уплотнением грунта выглаживалась горизонтальная площадка с уровнем, соответствующим началу копания. Исследуемый отвал устанавливался в тензометрическую тележку. Производилось заглубление отвала на

фиксированную величину. Далее включалась измерительная аппаратура и осуществлялся процесс копания грунта, результаты которого фиксировались оборудованием.

Перед проведением эксперимента с помощью сдвигового прибора измерялись сцепление и угол внутреннего трения, характеризующие свойства исследуемой категории грунта. Дополнительно измерялись угол внешнего трения, плотность грунта ненарушенной структуры, плотность разрыхленного грунта [11]. Результаты этих измерений представлены в табл. 2.

С целью исключения влияния систематических погрешностей, неконтролируемым образом изменяющихся во времени, а также для исключения влияния параметров, изменяющихся неконтролируемым образом в пространстве, например, неоднородность грунта при некачественном уплотнении, во время эксперимента проводилась рандомизация опытов.

При последующей обработке результатов определялись максимальные и средние значения горизонтальной составляющей сопротивления копанию и соответствующие значения удельного сопротивления резанию.

На рис. 6 представлена совмещенная осциллограмма для режимов копания моделями отвала «БЕЛАРУС-1502» и отвала с рекомендуемыми параметрами с толщиной стружки 2 см в процессе набора полной призмы волочения.

Табл. 2. Физико-механические свойства грунта

Наименование показателя	Категория грунта
	II
Число ударов плотномера	6
Сцепление грунта c , кПа	4
Остаточное сцепление грунта c_p , кПа	0,45
Угол внутреннего (грунта по грунту) трения ρ , град	28
Угол внешнего (грунта по металлу) трения ω , град	25
Плотность грунта на ноже ρ_r , т/м ³	1,7

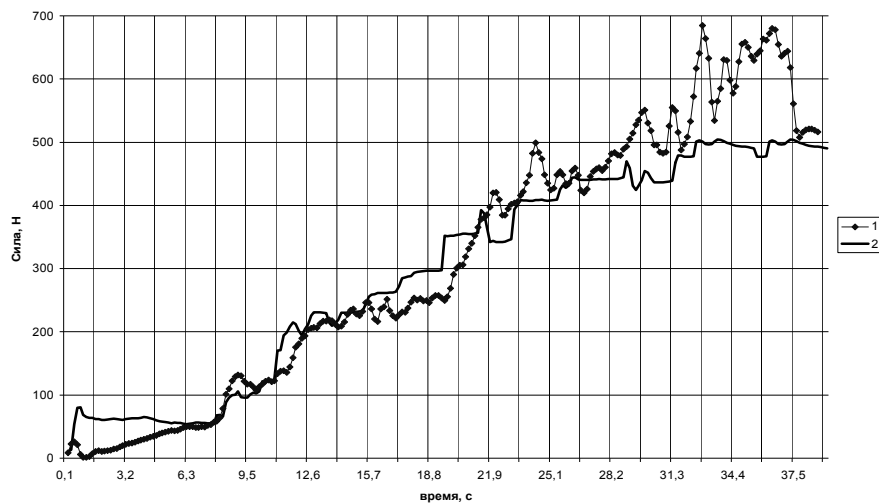


Рис. 6. Осциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 2 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

Процесс набора призмы волочения занимает обоими отвалами примерно одинаковое время: около 6 с. В дальнейшем на протяжении набора призмы волочения практически до козырька отвала рост сил сопротивления копанию на двух отвалах почти одинаков. На завершающей стадии набора призмы волочения силы сопротивления копанию на отвале с рекомендуемыми параметрами изменяются с меньшими величинами, чем на отвале «БЕЛАРУС-1502». Аналогичные результаты получены во время проведения теоретических исследований.

Методика определения необходимого числа опытов

Необходимое число опытов устанавливалось статистическим путем исходя из величины характерного для данного метода испытаний коэффициента вариации $K_{\text{вар}}$ и требуемой степени точности результата $K_{\text{доп}}$. Основываясь на многочисленных экспериментах по определению механических свойств грунтов, проведенных в Институте горного дела [12, 13], принимаем рекомен-

дуемое значение $K_{\text{доп}} = 12 \%$.

Копание грунта представляет собой процесс периодического отделения стружки грунта с параллельным набором призмы волочения, сопровождающийся соответствующим изменением сил, что видно из осциллограмм, приведенных на рис. 6...8. При фиксации экстремальных значений сил необходимо знать их минимальное количество, обеспечивающее принятую точность измерений. Для получения единого диапазона фиксации результатов измерений принята длина пути, которая обеспечивает набор полной призмы волочения для всех опытов с одинаковой толщиной стружки. Поскольку при проведении эксперимента количество колебаний сил трудно фиксировать, то определялись количество колебаний в процессе набора грунта, отклонение значений последующего максимума от предыдущего для того, чтобы получившаяся выборка экстремальных значений сил соответствовала налагаемым требованиям достоверности. Замеры выполнялись для участка, соответствующего росту призмы волочения.

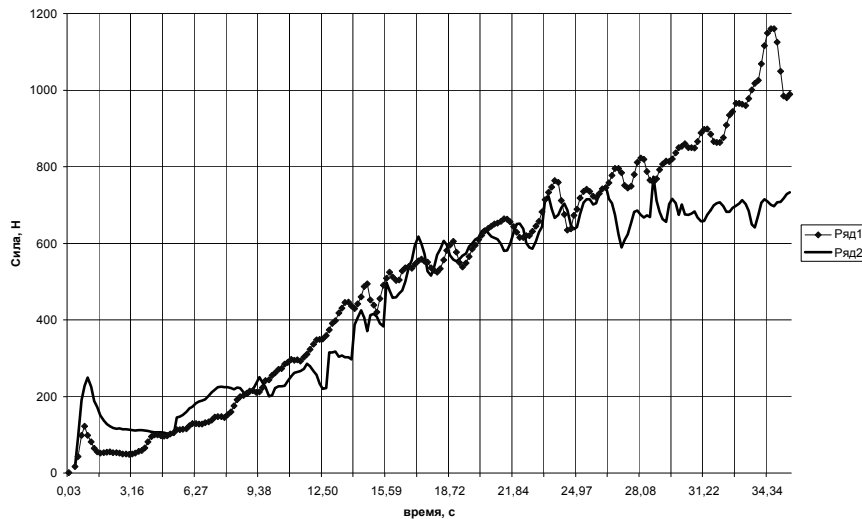


Рис. 7. Осциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 4 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

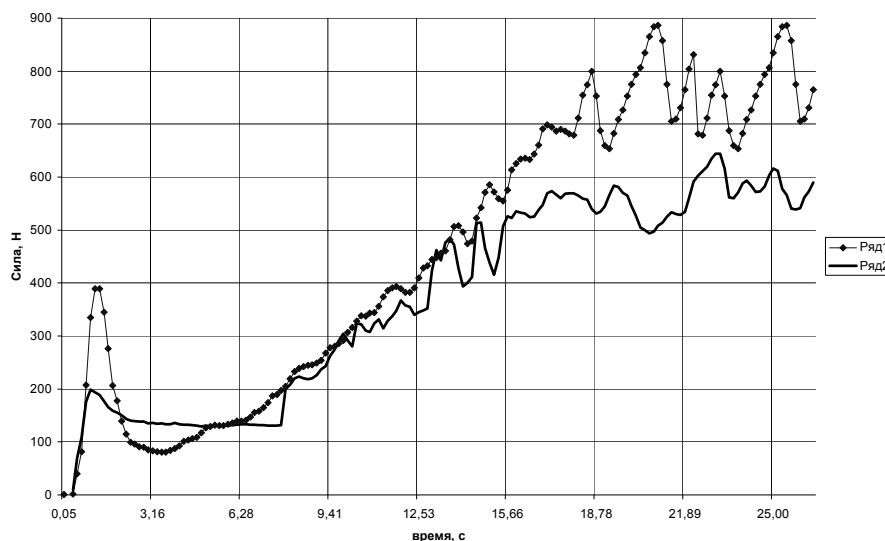


Рис. 8. Осциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 3 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

С этой целью проводились начальные эксперименты, данные для которых снимались на всей протяженности участка копания. После чего с помощью программного обеспечения MS Excel определялись среднее арифметическое количества колебаний и разницы между соседними максимумами в процессе роста призмы волочения, их максимальные значения и среднеквадратичное отклонение.

Для определения необходимого числа опытов предварительно было проведено 10 опытов при одних и тех же условиях. По полученным средним значениям количества колебаний и математического ожидания разницы между соседними максимумами осуществлялась статистическая обработка, на основании результатов которой, используя методику [12], можно было найти рекомендуемое количество опытов. Результаты представлены в табл. 3.

Табл. 3. Статистические данные опытов

Номер опыта	Количество колебаний	Математическое ожидание разницы между максимумами
1	15	33,3788
2	12	34,846
3	14	42,182
4	13	35,9464
5	11	41,0816
6	13	42,182
7	12	38,514
8	15	32,6452
9	14	41,4484
10	14	35,9464
Математическое ожидание	13,3	31,51
Среднеквадратичное отклонение	1,26	7,22
Коэффициент вариации	9,47	22,9
$\frac{K_{\text{ДОП}}}{K_{\text{ВАР}}}$	1,26	0,52
Необходимое количество опытов		5

Таким образом, для каждой из модели отвала с рекомендуемыми параметрами проводилось пять опытов при толщине стружки 0,02 м с записью результатов измерений в файл и последующим их статистическим анализом.

Сопоставление экспериментальных и теоретических исследований

Экспериментальные данные, вследствие их неизбежного рассеяния, должны обрабатываться статистическими методами. Для каждого опыта из имеющихся значений составляющих сопротивления резанию определялось их среднее значение. После этого по результатам всех опытов, проводимых при одних и тех же условиях, окончательно рассчитывалось среднее значение параметра, по которому и выявлялось расхождение с расчетным значением.

При сопоставлении экспериментальных результатов с теоретическими,

определенными по разработанной методике, возможны их расхождения, причинами которых являются:

- допущения, принятые в методике расчета и в расчетных схемах;
- неизбежные погрешности измерений при экспериментальных исследованиях;
- неизбежные погрешности при определении физико-механических свойств грунта.

Расхождения теоретических и экспериментальных значений для горизонтальной составляющей сопротивления резанию приведены в табл. 4. Результаты получены для первой категории грунта при толщине стружки 0,02 м, радиусе криволинейной части отвала 1,2 м, угле резания 53°, угле установки отвала 71°, длине прямолинейной части отвала 0,2 м. Сопоставительный анализ представлен в табл. 4.

Табл. 4. Экспериментальные и теоретические результаты исследований

Номер опыта	Количество колебаний	Математическое ожидание разницы между максимумами	Среднеквадратичное отклонение
1	11	33,8	7,2
2	11	47,6	8,6
3	13	34,9	9,4
4	15	31,2	7,1
5	14	42,7	10,8
Теоретическое значение	14	35,6	9,5

Анализ результатов (см. табл. 4) показывает, что значения математического ожидания разницы между пиками колебаний находятся внутри диапазона тех же значений, полученных экспериментальным путем. Результаты аналогичны и для среднеквадратичного отклонения.

Выводы

Экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретических исследований, проведенных с помощью методик, разработанных авторами.

Накопленный экспериментальный материал, полученный при разных режимах работы, позволил выполнить сопоставительный анализ по параметрам, доступным инструментальному контролю.

Анализ показал, что разработанные теоретические положения, используемые для копания грунта отвалом

бульдозера, адекватно отражают характер явлений, происходящих при этом виде копания, и дают хорошую сходимость с экспериментальными результатами.

Наиболее существенное влияние на величины сил сопротивления копанию оказывает величина радиуса криволинейной части отвала. Увеличение радиуса на 40 % привело к снижению сил сопротивления копанию на завершающей стадии (при полной призме волочения) на 20...30 % в зависимости от толщины стружки.

Значения радиуса криволинейной части профиля отвала бульдозера, получаемые при проектировании на основании [14], необходимо увеличивать на 30...40 %, если есть необходимость снижения сил сопротивления копанию, при разработке грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ветров, Ю. А.** Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1965. – 123 с.
2. **Дидух, Б. И.** Упругопластическое деформирование грунтов / Б. И. Дидух. – М. : Изд-во Ун-та дружбы народов, 1987. – 168 с.
3. **Завьялов, А. М.** Экспериментальные исследования процесса копания грунта неповоротным отвалом бульдозера / А. М. Завьялов, Т. Е. Болдовская // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 6. – С. 21–28.
4. **Домбровский, Н. Г.** Землеройные машины / Н. Г. Домбровский, С. А. Панкратов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 321 с.
5. **Ветров, Ю. А.** Сопротивление грунтов резанию / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1962. – 96 с.
6. **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Изв. вузов. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102–107.
7. **Берестов, Е. И.** Методика определения параметров больших и малых сдвигов при копании грунта отвальным рабочим органом / Е. И. Берестов, И. В. Лесковец // Строительная наука и техника. –

2009. – № 1. – С. 86–91.

8. **Баловнев, В. И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 336 с.

9. **Баловнев, В. И.** Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов / В. И. Баловнев. – М. : Росвузиздат, 1963. – 95 с.

10. **Баловнев, В. И.** Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1974. – 232 с.

11. **Берестов, Е. И.** Математическое моделирование динамических процессов при резании грунта / Е. И. Берестов // Совершенствование существующих и создание новых ресурсосберегающих технологий и оборудования в машиностроении, сварочном производстве и строительстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 3–5 мая 1991 г. – Могилев, 1991. – С. 56–58.

12. **Зеленин, А. Н.** Физические основы теории резания грунтов / А. Н. Зеленин. – М. : АН СССР, 1950. – 187 с.

13. **Зеленин, А. Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 198 с.

14. Справочник конструктора дорожных машин / И. П. Бородачев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. – 504 с.

Статья сдана в редакцию 20 января 2015 года

Игорь Вадимович Лесковец, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: le@bru.by.

Евгений Иванович Берестов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-291-24-89-95.

Алла Петровна Смоляр, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

Igor Vadimovich Leskovets, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: le@bru.by.

Yevgeny Ivanovich Berestov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-291-24-89-95.

Alla Petrovna Smolyar, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.

УДК 623.437.42

Д. А. Линник

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МАСС КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА С МОДЕЛИРОВАНИЕМ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПЭВМ

UDC 623.437.42

D. A. Linnik

THEORETICAL RESEARCH OF MASS FLUCTUATIONS OF WHEELED TRACTORS WITH PC MODELING OF RANDOM DISTURBANCES

Аннотация

Определены оптимальные параметры упругодиссипативных характеристик подвески кабины водителя колесного трактора (вторичное поддрессирование). Рассмотрена математическая модель колебательного движения колесного трактора с поддрессированной кабиной. Получены дифференциальные уравнения колебаний масс с помощью уравнения Лагранжа 2-го рода. Разработаны алгоритм и программа имитационного моделирования колебательного движения колесного трактора с поддрессированной кабиной.

Ключевые слова:

колесный трактор, виброзащита, математическая модель, поддрессированная масса, уравнение Лагранжа 2-го рода, неровность, алгоритм, имитационное моделирование, среда моделирования Delphi 7 Professional, спектральная плотность.

Abstract

The objective of the research was to determine the optimal parameters of elastic-dissipative characteristics of the suspension of a wheeled tractor driver cab (secondary cushioning) with the view of their practical implementation. The mathematical model of vibratory motion of a wheeled tractor with a sprung cab has been considered. Differential equations of mass fluctuations have been obtained by using the Lagrange equations of the 2nd kind. The algorithm and the simulation program of vibratory motion of a wheeled tractor with a sprung cab have been developed.

Key words:

wheeled tractor, vibration protection, mathematical model, sprung mass, the Lagrange equation of the 2nd kind, roughness, algorithm, simulation modeling, Delphi 7 Professional modeling environment, spectral density.

В настоящее время Республика Беларусь входит в десятку основных мировых производителей колесных тракторов, поэтому в условиях ускоренного развития рыночных отношений и обострения конкуренции на мировом рынке тракторостроение страны должно выйти на качественно новый уровень, обеспечивающий высокие технические показатели, повышенную надежность и долговечность колесных тракторов, ко-

торые по условиям труда должны соответствовать требованиям международных стандартов [1–8].

Большинство ведущих фирм Европы, США и Японии выделяют значительные средства на решение проблем, связанных с обеспечением высоких технических показателей, повышением надежности и долговечности тракторов, создавая тем самым условия для претворения теоретических исследований в

практику.

Традиционно основное внимание при решении задач виброзащиты водителя колесных тракторов уделяется подвеске сиденья и кабины водителя, что объясняется спецификой конструкции трактора и условиями его эксплуатации.

Задача виброзащиты водителя решается путем создания эффективных систем поддрессоривания сиденья и поддрессоривания кабины водителя. В современных колесных тракторах для улучшения виброзащиты водителя колесного трактора широко используется способ вторичного поддрессоривания (поддрессоривание кабины).

Научные методы проектирования подвесок сидений и кабины водителя колесного трактора с эффективной системой виброзащиты и улучшенной эргономикой обеспечат повышение производительности и конкурентоспособности тракторной техники, производимой в Республике Беларусь, и поэтому их разработка представляет актуальную народно-хозяйственную и научную задачу.

Целью перспективных исследований является выбор оптимальных параметров вторичного поддрессоривания водителя колесного трактора, позволяющих существенно повысить виброзащитные свойства рабочего места водителя колесного трактора [1–8].

В настоящее время проблемы, связанные с выбором оптимальных характеристик подвески, наиболее эффективно решаются с помощью математического моделирования динамических систем на ПЭВМ, использующих эффективные компьютерные технологии. ПЭВМ дает возможность выполнить качественный прогноз поведения проектируемой динамической системы в реальных условиях, позволяя аргументированно решать проблему выбора оптимальных параметров упругодиссипативных характеристик элементов поддрессоривания.

Для создания эффективной вибро-

защитной системы водителя колесного трактора составлена математическая модель колесного трактора с поддрессоренной кабиной (рис. 1) [1, 7, 8].

Для однозначного определения местоположения поддрессоренных масс колесного трактора над опорной поверхностью введены следующие обобщенные координаты: z_C – линейная координата вертикального перемещения центра масс остова, м; z_V – линейная координата вертикального перемещения центра масс сиденья водителя, м; z_K – линейная координата вертикального перемещения центра масс кабины, м; z_3 – линейная координата вертикального перемещения центра масс переднего колеса, м; φ_C – угловая координата перемещения остова трактора вокруг поперечной оси, проходящей через центр масс остова трактора, град; φ_K – угловая координата перемещения кабины трактора вокруг поперечной оси, проходящей через центр масс кабины трактора, град.

Далее обозначены массогеометрические параметры рассматриваемой механической системы: m_C – поддрессоренная масса остова трактора, кг; m_V – поддрессоренная масса сиденья вместе с водителем, кг; m_K – поддрессоренная масса кабины трактора, кг; m_3 – масса переднего колеса, кг; J_C – момент инерции остова трактора относительно его поперечной оси, кг·м²; J_K – момент инерции кабины трактора относительно ее поперечной оси, кг·м²; l_1 – расстояние от центра масс остова трактора до его передней оси, м; l_2 – расстояние от центра масс остова трактора до его заднего моста, м; l_n – расстояние между осями опор кабины по длине, м; l_a – расстояние между передней осью опоры кабины и осью, проходящей через центр масс остова трактора, м;

l_v – расстояние от центра масс сиденья вместе с водителем до центра масс остова трактора, м; l_k – расстояние от центра масс кабины трактора до центра масс остова трактора, м; h_v – расстоя-

ние от центра масс остова трактора до центра масс сиденья вместе с водителем по высоте, м; h_k – расстояние от центра масс остова трактора до центра масс кабины трактора по высоте, м.

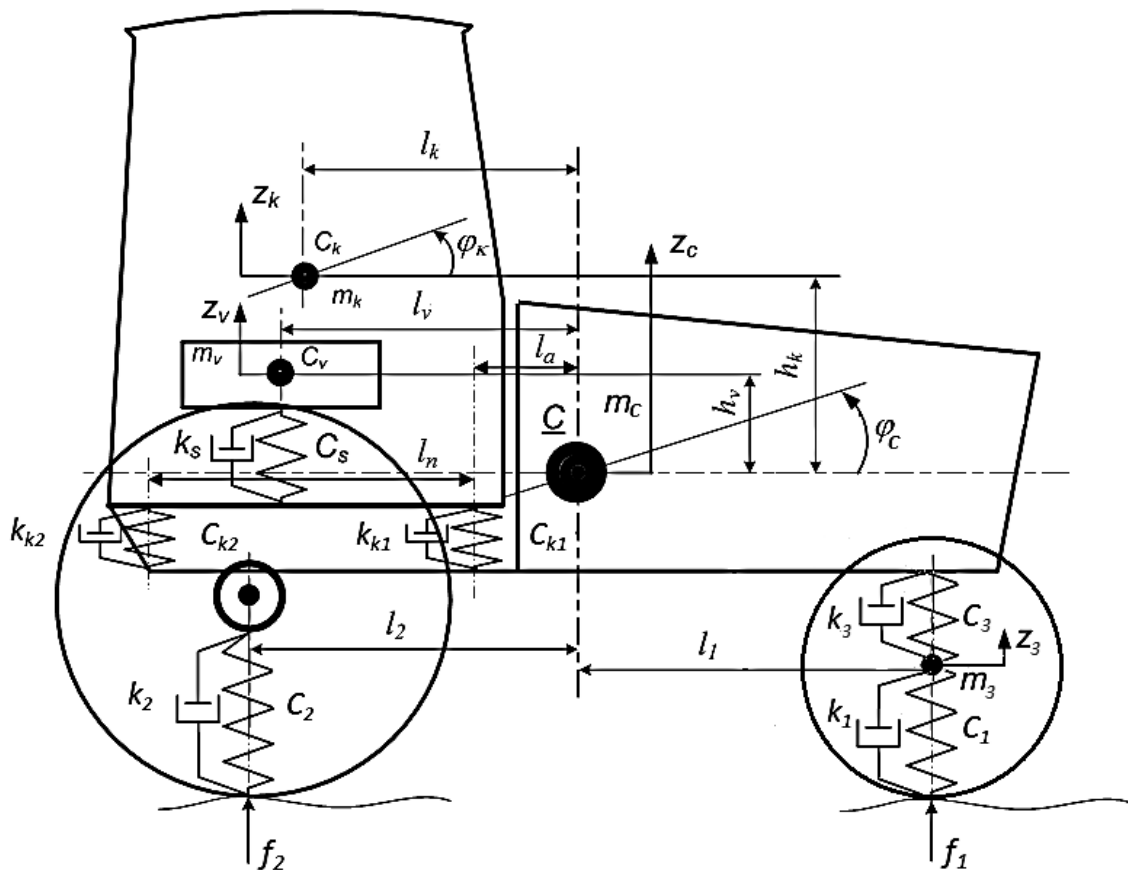


Рис. 1. Математическая модель колебательного движения колесного трактора с подрессоренной кабиной

Введены следующие обозначения упругодиссипативных характеристик подвесок и шин трактора: c_1 – жесткость шин колес передней оси трактора, Н/м; c_2 – жесткость шин колес заднего моста трактора, Н/м; c_3 – жесткость переднего амортизатора, Н/м; c_{k1} – жесткость передних опор кабины трактора, Н/м; c_{k2} – жесткость задних опор кабины трактора, Н/м; c_s – жесткость подвески сиденья водителя, Н/м; k_1 – коэф-

фициент вязкого сопротивления шин колес передней оси трактора, Н·с/м; k_2 – коэффициент вязкого сопротивления шин колес заднего моста трактора, Н·с/м; k_3 – коэффициент вязкого сопротивления амортизатора подвески переднего моста трактора, Н·с/м; k_{k1} – коэффициент вязкого сопротивления передних опор кабины трактора, Н·с/м; k_{k2} – коэффициент вязкого сопротивления задних опор кабины трактора, Н·с/м; k_s – коэффициент вязкого сопротивления подвески

сиденья водителя, Н·с/м.

Для описания неровностей микропрофиля опорной поверхности использованы следующие функции: f_1 – функция, описывающая возмущение со стороны неровностей микропрофиля опорной поверхности для передних колес трактора; f_2 – функция, описывающая возмущение со стороны неровностей микропрофиля опорной поверхности для задних колес трактора.

За положительное направление линейных обобщенных координат принято направление координатных осей, а угловых – направление против часовой стрелки (см. рис. 1).

Для составления дифференциальных уравнений колебательных и вращательных движений центров масс колесного трактора использовано уравнение Лагранжа 2-го рода [1, 7]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_i} = Q_i - \frac{\partial \Pi}{\partial z_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_i};$$

$$i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где T , Π , Φ – кинетическая, потенциальная энергии и диссипативная функция, Дж; z_i , Q_i – обобщенные координаты и обобщенная работа моделируемой системы; n – число обобщенных координат.

По формуле (1) определены составляющие уравнения Лагранжа 2-го рода: кинетическая, потенциальная энергии и диссипативная функция.

Высота неровностей задается или случайной функцией, где можно задавать высоту и длину неровности, или функциями вида

$$h = A \cdot \sin(\omega \cdot x); \quad (2)$$

$$h = \frac{h_{\text{нер}}}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{Z_{\text{нер}}} \right), \quad (3)$$

где A – амплитуда неровностей, мм; ω – циклическая частота, Гц; $h_{\text{нер}}$ – высота неровности, мм; $Z_{\text{нер}}$ – длина неровности, мм; x – текущая координата контура неровности, мм.

Функции (2) и (3) описывают одинаковые поверхности, но применяются при различных типах исходных параметров профиля поверхности.

Для решения дифференциальных уравнений первого порядка, полученных в процессе составления математической модели, использован численный метод Рунге–Кутты, один из наиболее применимых на практике, т. к. обеспечивает высокую точность и в то же время отличается сравнительной простотой; он описывается следующими уравнениями [7]:

$$y_{i+1} = y_n + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4); \quad (4)$$

$$k_1 = f(x_n, y_n); \quad (5)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} \cdot k_1\right); \quad (6)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} \cdot k_2\right); \quad (7)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + h \cdot k_3), \quad (8)$$

где k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – порядки уравнения; h – шаг интегрирования, м; n – индекс сетки; x_n , y_n – входные параметры.

Разработан алгоритм программы имитационного моделирования колебаний масс колесного трактора (рис. 2) [7].

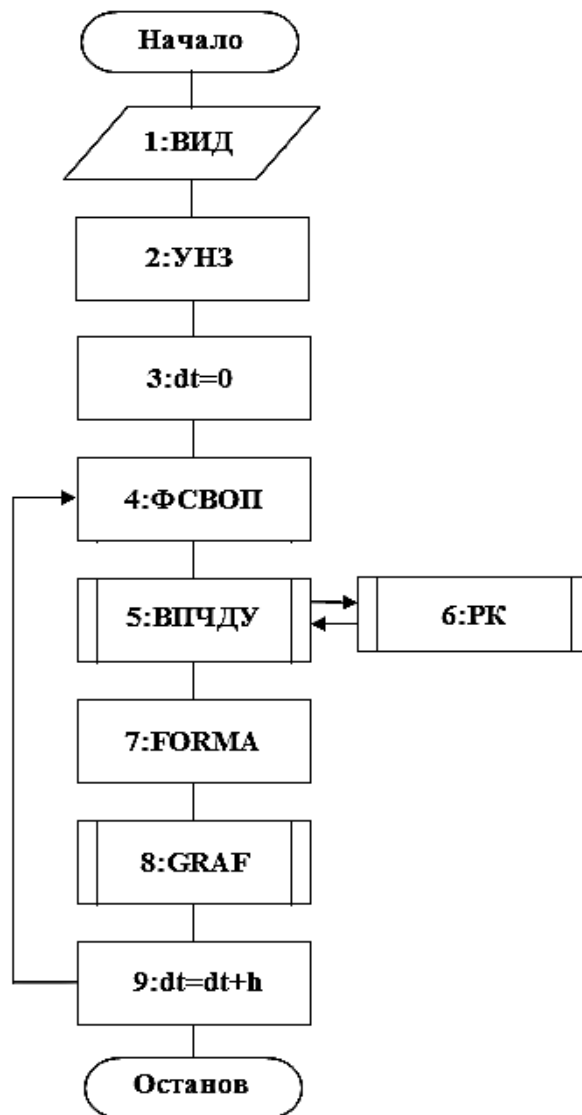


Рис. 2. Схема алгоритма программы имитационного моделирования колебаний масс колесного трактора

Представленный алгоритм программы состоит из следующих блоков.

Начало моделирования.

1: ВИД – ввод исходных данных.

2: УНЗ – установка начальных значений.

3: $dt = 0$ – начальное значение времени (независимой переменной).

4: ФСВОП – формирование случайных воздействий опорной поверхности.

5: ВПЧДУ – вычисление правых частей дифференциальных уравнений.

6: РК – использование метода Рунге–Кутты для вычисления правых частей дифференциальных уравнений.

7: FORMA – увеличение независимой переменной на шаг интегрирования.

8: GRAF – формирование массивов обобщенных координат для построения графиков.

9: $dt = dt + h$ – построение графиков.

Окончание моделирования.

Принципом функционирования данного алгоритма является то, что все вычисления должны выполняться в строго определенной последовательности.

Для разработки программы имитационного моделирования использовалась среда Delphi 7 Professional (рис. 3).

Среда разработки Delphi максимально упрощает создание приложения и облегчает процесс формирования программы. При этом можно больше внимания уделить логике выполнения программы и непосредственно заниматься созданием математической части приложения. Delphi 7 Professional является

сбалансированной средой быстрой разработки приложений для Windows с помощью языка Object Pascal. Интегрированная среда разработки Delphi 7 Professional включает в себя встроенный отладчик, подсветку синтаксиса, навигацию по исходному коду с системой закладок [11].

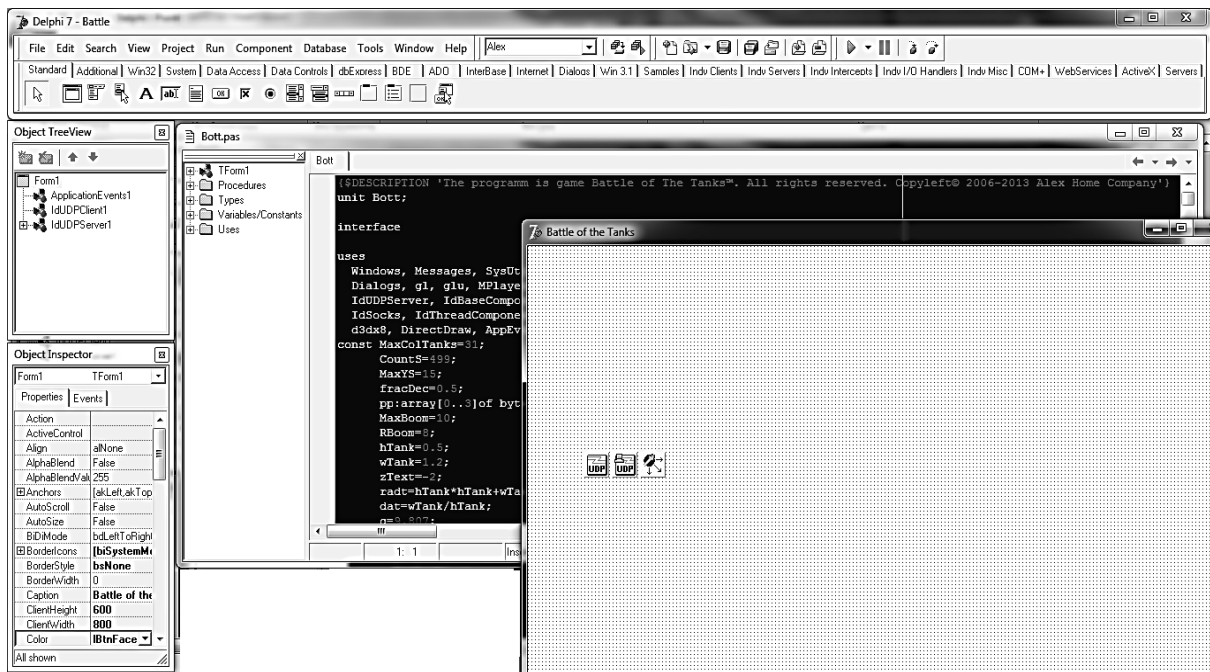


Рис. 3. Главное окно программы Delphi 7 Professional

С помощью окна «Параметры» (рис. 4) задаются исходные данные для выполнения расчета.

Разработанная программа имитационного моделирования имеет такие возможности, как:

- визуализация движения колесного трактора;
- вывод графиков ускорения, скорости и перемещения рабочего места водителя, а также экспорт их в MS Excel;
- вывод спектральной плотности ускорения в диапазоне частот 1...8 Гц;
- вывод значений среднеквадратичного отклонения и дисперсии высоты неровности микропрофиля дороги;
- вывод значений среднеквад-

ратичного отклонения и максимального значения ускорения на рабочем месте водителя;

- вывод значений максимальной силы, действующей на виброизоляторы опор кабины;
- вывод скорости сжатия виброизоляторов опор кабины.

Процесс моделирования происходит в режиме реального времени с наглядным представлением результатов движения трактора (рис. 5).

На рис. 6 и 7 представлены графики спектральной плотности ускорений на рабочем месте водителя при движении колесного трактора по опорной поверхности со случайным микропрофилем [9, 10].

В качестве числовых характеристик случайных возмущений использовались корреляционная функция, спектральная плотность, дисперсия и среднеквадратичное отклонение. Для характеристики передаточных функций колебательной системы применялся квадрат модуля передаточной функции по соответствующим

обобщенным координатам.

На рис. 8 и 9 представлены графики спектральной плотности ускорений на рабочем месте водителя при движении колесного трактора по опорной поверхности с заданным микропрофилем ($h_{\text{нер}} = 100$ мм, $Z_{\text{нер}} = 300$ мм) [9, 10].

Рис. 4. Окно «Параметры» программы имитационного моделирования: 1 – масса колеса; 2 – диаметр колеса; 3 – диаметр диска колеса; 4 – ширина колеса; 5 – давление в колесе; 6 – расстояние от центра масс остова трактора до его передней оси; 7 – расстояние от центра масс остова трактора до его заднего моста; 8, 9 – масса остова и момент инерции остова трактора; 10, 11 – масса и момент инерции кабины; 12, 13 – коэффициент жесткости и вязкого сопротивления виброизолятора; 14 – длина виброизолятора; 15, 16 – коэффициент жесткости и вязкого сопротивления подвески сиденья водителя; 17 – масса водителя с сиденьем; 18 – длина пружины сиденья; 19, 20 – коэффициент жесткости и вязкого сопротивления переднего амортизатора; 21 – длина переднего амортизатора; 22 – частота сохранения данных для экспорта; 23...25 – функция генерации неровностей и ее параметры; 26 – масштаб визуализации; 27 – максимальная высота неровности; 28 – задержка (определяет скорость движения); 29 – расстояние между передней осью опоры кабины и центром масс остова трактора; 30 – расстояние между осями опор кабины по длине; 31 – расстояние от центра масс кабины трактора до центра масс остова трактора; 32 – расстояние от центра масс сиденья вместе с водителем до центра масс остова трактора

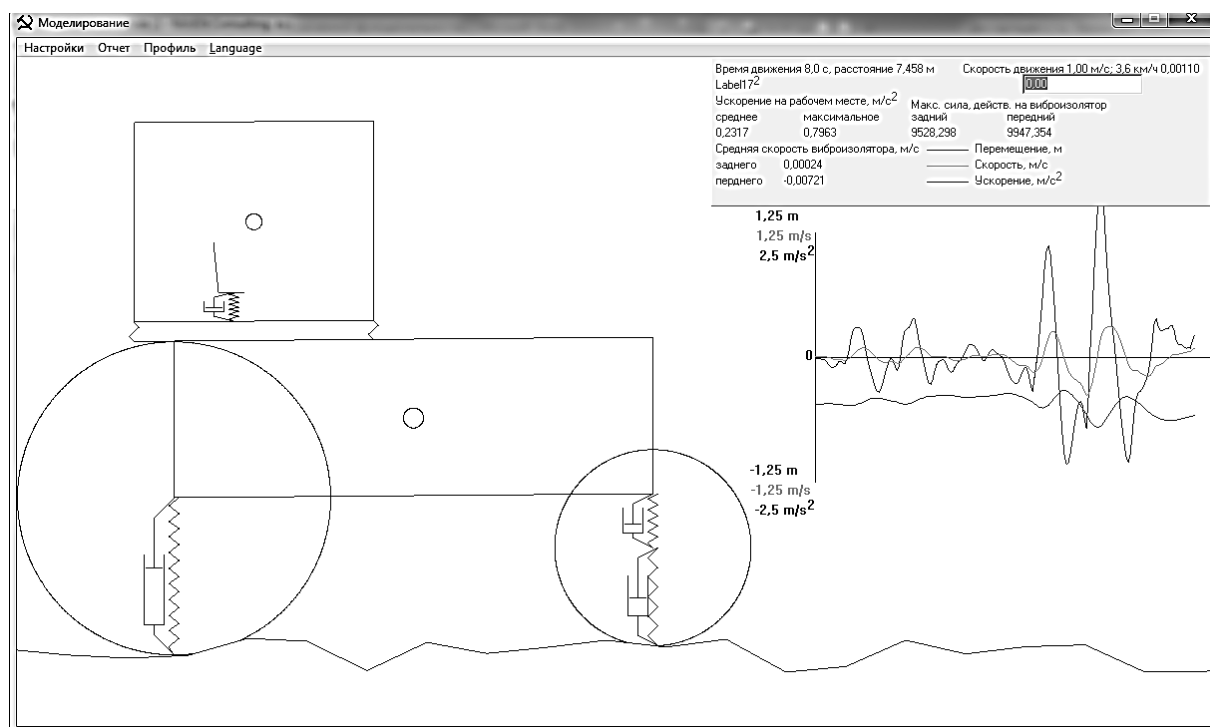


Рис. 5. Главное окно программы моделирования

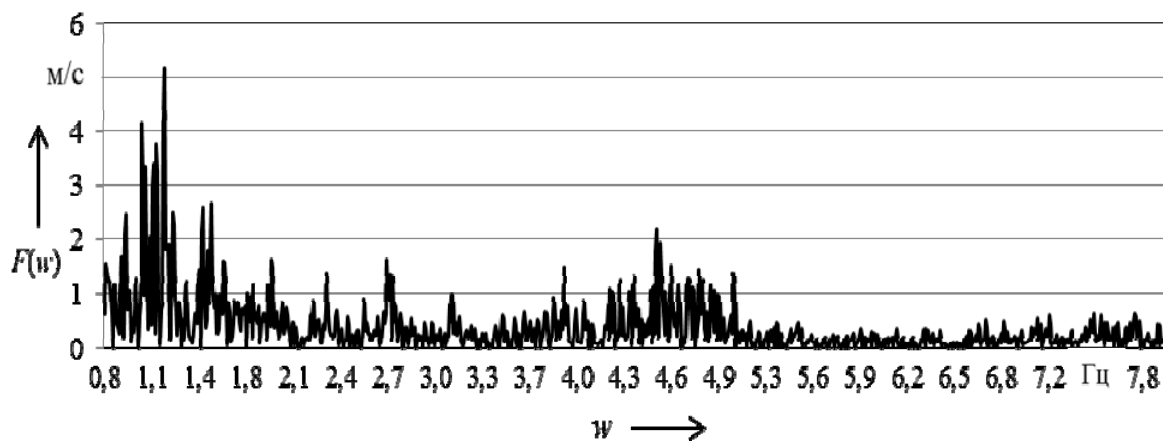


Рис. 6. График спектральной плотности ускорения на рабочем месте водителя (опорная поверхность со случайным микропрофилем): $V = 3,6 \text{ км/ч}$, $k_S = 800 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$

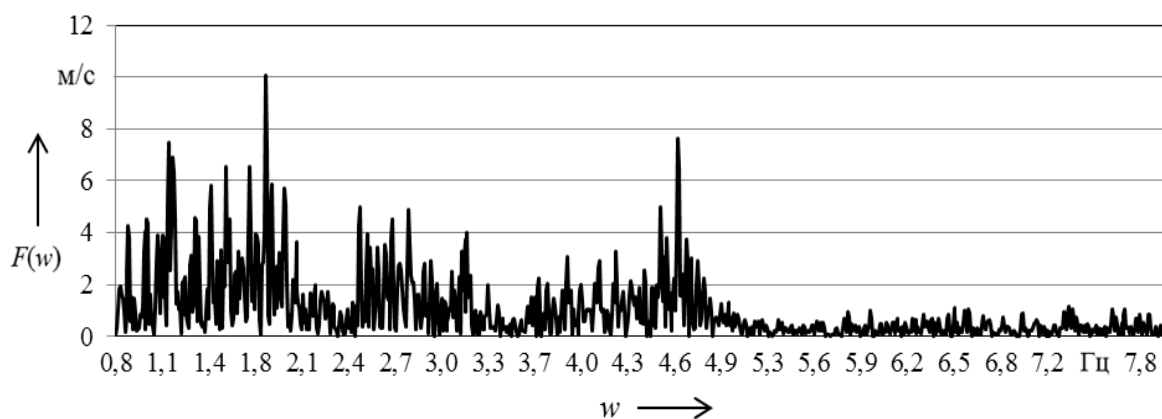


Рис. 7. График спектральной плотности ускорения на рабочем месте водителя (опорная поверхность со случайным микропрофилем): $V = 9$ км/ч, $k_S = 800$ Н · с/м

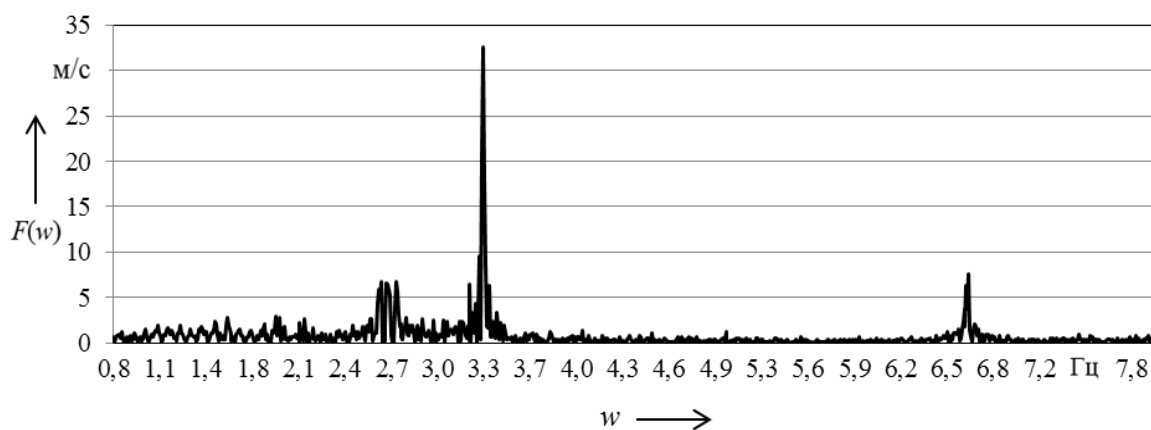


Рис. 8. График спектральной плотности ускорения на рабочем месте водителя (опорная поверхность с заданным микропрофилем): $V = 3,6$ км/ч, $k_S = 800$ Н · с/м

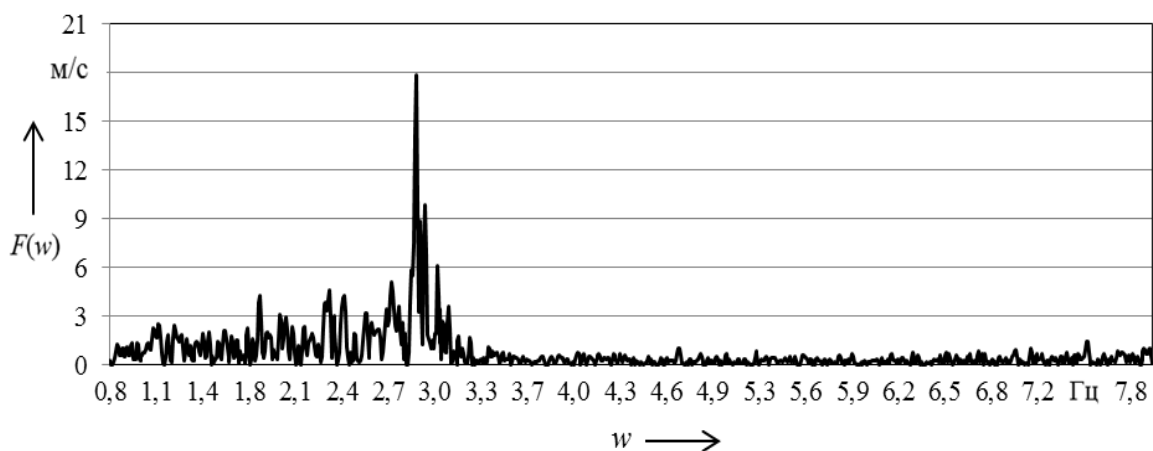


Рис. 9. График спектральной плотности ускорения на рабочем месте водителя (опорная поверхность с заданным микропрофилем): $V = 9$ км/ч, $k_S = 800$ Н · с/м

В настоящее время имеется достаточное количество данных по характеристикам профилей дорог как функций воздействия на агрегаты колесных тракторов. Например, в [9] приводятся результаты обработки информации, полученной при профилировании (нивелиром) различных дорог (с асфальтовым и цементобетонным покрытиями, а также булыжником различного качества).

Значения среднеквадратичных отклонений для дорог с асфальтовым покрытием $\sigma_f = 0,8 \dots 1,26$ см, для дорог с цементобетонным покрытием $\sigma_f = 0,5 \dots 1,24$ см и для булыжника $\sigma_f = 1,35 \dots 3,28$ см.

Для нормированных корреляционных функций профилей дорог предложены следующие осредненные расчетные аналитические выражения:

– для булыжника удовлетворительного качества

$$\rho(L) = e^{-0,45|L|}$$

или

$$\rho(L) = 0,8e^{-0,3|L|} + 0,2e^{-0,32|L|} \cdot \cos(L); \quad (9)$$

где L – длина неровности, мм;

– для булыжника со впадинами и буграми

$$\rho(L) = 0,85e^{-0,5|L|} + 0,2e^{-0,2|L|} \cdot \cos(2L); \quad (10)$$

– для асфальта

$$\rho(L) = 0,85e^{-0,2|L|} + 0,15e^{-0,05|L|} \cdot \cos(0,6L); \quad (11)$$

– для бетона

$$\rho(L) = e^{-0,15|L|}. \quad (12)$$

В [12] приводятся материалы обработки профилей участков различных полевых дорог. При аппроксимации получено выражение

$$\rho(L) = e^{-\alpha|L|} \cdot \cos(\beta \cdot L), \quad (13)$$

где α и β – коэффициенты корреляционных связей, $\alpha = 0,014 \dots 0,1 \text{ м}^{-1}$,

$$\beta = 0,025 \dots 0,14 \text{ м}^{-1}.$$

Более тщательный анализ статистических характеристик профилей поверхности различных полей показал, что их корреляционные функции лучше всего аппроксимировать аналитическим выражением вида

$$\rho(L) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1|L|} \cdot \cos(\beta_1 \cdot L) + A_2 \cdot e^{-\alpha_2|L|} \cdot \cos(\beta_2 \cdot L). \quad (14)$$

Анализ результатов имитационного моделирования колебаний масс колесного трактора позволил сделать следующие **выводы**.

1. Разработанная математическая модель колебаний масс колесного трактора позволяет исследовать колебания сиденья водителя при различных характеристиках упругодиссипативных элементов подвески ($D = 12,5 \dots 26,2 \text{ см}^2$; $\sigma_f = 3,54 \dots 5,12 \text{ см}$; среднеквадратичное ускорение на рабочем месте $0,9 \dots 1,45 \text{ м/с}^2$).

2. Программа моделирования на ПВЭМ позволяет определить оптимальные значения параметров упругодиссипативных элементов подвески сиденья ($c_s = 130 \text{ Н/м}$, $k_s = 1,2 \text{ Н·с/м}$).

3. Спектральный анализ ускорений на рабочем месте водителя колесного трактора показывает, что при наезде на случайные неровности микропрофиля опорной поверхности вероятность возникновения максимальных ускорений лежит в диапазоне частот от 1,0 до 5,0 Гц (см. рис. 6 и 7), а при движении по дороге с определенно заданным микропрофилем опорной поверхности вероятность возникновения максимальных ускорений при $V = 3,6 \text{ км/ч}$ лежит в диапазоне частот от 3,2 до 3,4 Гц (см. рис. 8), при $V = 9 \text{ км/ч}$ – в диапазоне частот от 2,8 до 3,0 Гц (см. рис. 9).

4. Наиболее эффективным средством гашения колебаний на сиденье водителя колесного трактора является подрессоривание заднего моста. Однако такая система является дорогостоящей и

потребуется значительных изменений в компоновке трактора.

5. Значительно снизить уровень колебаний на сиденье водителя колесного трактора можно с помощью упругих элементов с нелинейными характеристиками, используемых в подвеске

сиденья и подвеске кабины (вторичное поддрессирование). В этом случае характеристика упругого элемента должна обеспечить постоянство частоты собственных колебаний в широком диапазоне изменения статической деформации самого упругого элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амельченко, Н. П.** Подвеска сиденья водителя колесного трактора / Н. П. Амельченко, В. А. Ким. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 187 с.
2. **Амельченко, Н. П.** О выборе демпфирования в подвеске тракторного сиденья / Н. П. Амельченко // Механика машин. Теория и практика : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 10–11 февр. 2003 г. – Минск : Белавтотракторостроение, 2003. – С. 345–348.
3. **Амельченко, Н. П.** О некоторых мерах гашения колебаний на сиденье колесного трактора / Н. П. Амельченко, В. А. Ким, О. В. Билык // Вестн. МГТУ. – 2001. – № 1. – С. 77–82.
4. Задачи создания эффективных виброзащитных систем водителя колесного трактора МТЗ / И. С. Сазонов [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2011 г. : в 2 ч. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – Ч. 2. – С. 59–60.
5. **Ким, В. А.** О некоторых мерах гашения колебаний на сиденье колесного трактора / В. А. Ким, О. В. Билык, Н. П. Амельченко // Вестн. МГТУ. – 2001. – № 1. – С. 77–82.
6. **Кошман, В. Н.** Исследование и снижение низкочастотных колебаний, действующих на водителя колесного трактора : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / В. Н. Кошман. – Минск, 1964. – 264 л.
7. **Линник, Д. А.** Разработка методов исследований виброзащитных систем водителя колесных тракторов : дис. ... магистра техн. наук : 37.80.01 / Д. А. Линник. – Могилев, 2012. – 94 л.
8. Динамика колесных машин / И. С. Сазонов [и др.] ; под общ. ред. И. С. Сазонова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 461 с.
9. **Силаев, А. А.** Спектральная теория поддрессирования транспортных машин / А. А. Силаев. – М. : Машиностроение, 1972. – 192 с. : ил.
10. **ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ.** Вибрационная безопасность. Общие требования. – Введ. 01.07.2008. – М. : НИЦ контроля и диагностики технических систем, 2008. – 18 с.
11. **Фленов, М. Е.** Библия Delphi / М. Е. Фленов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 880 с. : ил.
12. **Лурье, А. Б.** Статистическая динамика сельскохозяйственного агрегата / А. Б. Лурье. – Л. : Колос, 1970. – 376 с.

Статья сдана в редакцию 25 февраля 2015 года

Дмитрий Александрович Линник, магистр, Белорусско-Российский университет. E-mail: d.linnik@grsu.by.

Dmitry Aleksandrovich Linnik, MSc student, Belarusian-Russian University. E-mail: d.linnik@grsu.by.

УДК 669.017

Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко

АНАЛИЗ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ЛЕГИРОВАНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

UDC 669.017

F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko

ANALYSIS OF TRANSFORMATIONS OCCURRING DURING MECHANICAL ALLOYING OF IRON-BASED MULTICOMPONENT SYSTEMS

Аннотация

Представлены закономерности формирования структуры и фазового состава материалов, получаемых обработкой в механореакторе многокомпонентных композиций, перспективных для производства механически легированных жаропрочных сталей различного функционального назначения, имеющих температуру рекристаллизации выше 1000 °С.

Ключевые слова:

железные композиции, механическое легирование, закономерности, структурно-фазовые превращения, типы упрочнения.

Abstract

The papers presents patterns of formation of structure and phase composition of materials obtained by treating multicomponent compositions in the mechano-reactor which are promising for the production of mechanically alloyed heat resistant steels for different functional purposes, their recrystallization temperature being above 1000 °С.

Key words:

iron compositions, mechanical alloying, patterns, structure and phase transformations, types of strengthening.

Введение

Дисперсно-упрочненные железные материалы по характеристикам жаропрочности существенно превосходят жаропрочные ферритные и аустенитные стали и как более дешевые перспективны также для замены материалов этого класса на основе никеля [1]. Последние находят широкое применение в энергетических установках, авиационной и космической технике. Их используют для изготовления камер сгорания и лопаток газовых турбин, стабилизаторов пламени и других деталей, эксплуатируемых при температурах, достигающих 1200 °С. Предполагается, что дис-

персно-упрочненные композиционные материалы на основе железа могут успешно заменить никелевые материалы для изготовления тяжелонагруженных деталей, работающих в интервале от 700 (предельная температура эксплуатации жаропрочных аустенитных сталей) до 900 °С. Также такие материалы обладают уникальным свойством – стойкостью против охрупчивания в условиях нейтронного облучения и могут использоваться в конструкциях атомных реакторов, подверженных интенсивному радиационному воздействию при повышенных температурах. Кроме того, дисперсное упрочнение позволяет

существенно увеличить прочность и жаропрочность фехралей и, как следствие, их температуру эксплуатации.

Перспективной является технология получения дисперсно-упрочненных материалов, базирующаяся на реакционном механическом легировании, предполагающем взаимодействие между компонентами и формирование упрочняющих фаз на стадии обработки порошковой смеси в механореакторе и при последующем отжиге образованной гранулированной композиции. При этом суб-/микроструктурный тип структуры основы, упрочненной наноразмерными включениями механически синтезированных фаз, в большей мере наследуется компактным материалом, получаемым, как правило, горячим прессованием. Технология универсальна и позволяет производить жаропрочные материалы на базе металлов, включая и железо, различного функционального назначения [1, 2]. Дисперсно-упрочненный материал представляет собой матрицу из металла или твердого раствора, в которой равномерно распределены дисперсные частицы упрочняющей фазы, стойкие против коагуляции и роста при нагреве до температур, достигающих $0,9T_{пл}$ основы.

Для дисперсного упрочнения металлов и сплавов, имеющих температуру плавления более $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, к которым относится железо, в качестве упрочняющих фаз представляют интерес тугоплавкие оксиды, нитриды и в некоторых случаях – карбиды, бориды, силициды, интерметаллиды, обладающие низкой величиной изобарно-изотермического потенциала образования и высоким значением модуля сдвига, а также термодинамически стабильные оксиды. По мере возрастания ΔG°_T их образования от $\sim -600\text{ кДж/(моль}\cdot\text{атом)}$ кислорода до $\sim -450\text{ кДж/(моль}\cdot\text{атом)}$ кислорода они располагаются в следующем порядке: CaO , ThO_2 , Y_2O_3 , BeO , MgO , La_2O_3 , HfO_2 , UO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , GeO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 [3, 4]. Приве-

денные оксиды имеют микротвердость $H_{0,49} > 2000$, что дает основание для предположения о высоком значении величины их модуля сдвига. С учетом безопасности, доступности и коррозионной стойкости круг перспективных для дисперсного упрочнения соединений существенно сужается и включает Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 . Если принимать во внимание вышеизложенные ограничения, в качестве упрочняющих фаз следует рассмотреть также нитриды ZrN , TiN , AlN , ΔG°_T – образования которых изменяется от $\sim -330\text{ кДж/(моль}\cdot\text{атом)}$ азота до $\sim -290\text{ кДж/(моль}\cdot\text{атом)}$ азота [3, 4]. Вместе с тем в связи с химической инертностью молекулярного азота непосредственный синтез нитридов в процессе реализации технологии маловероятен. Ряд карбидов HfC , ZrC , TiC , Nb_2C , TaC , Ta_2C , NbC имеют высокие значения температуры плавления и микротвердость, что указывает на возможность их использования в качестве упрочняющих фаз в жаропрочных материалах. Исходя из комплекса свойств роль карбидов как дисперсно-упрочняющих фаз по сравнению с оксидами и нитридами существенно ниже, что обусловлено их меньшей термодинамической стабильностью. В то же время общеизвестно, что карбиды таких элементов, как W , V , Mo , Cr , несмотря на относительно высокое значение термодинамического потенциала образования, широко применяются для дисперсионного упрочнения сталей, определяющего их теплостойкость. Для дисперсного упрочнения перспективнее оксиды. При учете наряду с физико-химическими свойствами технологического и экономического факторов наиболее пригодными для этой цели являются оксиды алюминия. Эффективный поставщик, необходимый для образования упрочняющих оксидов, – оксид молибдена MoO_3 .

Целью работы являлось установление закономерностей формирования структуры и фазового состава материа-

лов, получаемых обработкой в механо-реакторе многокомпонентных композиций, перспективных для производства механически легированных жаропрочных сталей различного функционального назначения, имеющих температуру рекристаллизации выше 1000 °С.

Исходные материалы, приборы, оборудование и методика исследования

Цель работы достигалась созданием комплексно-упрочненных сталей, сочетающих зернограницное, дисперсионное и дисперсное упрочнения. Выбор исходных порошковых композиций определялся следующими факторами:

- основными легирующими элементами для получения сталей различных классов (перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный) являются Сг и Ni;

- высокая прочность материалов в широком интервале температур обеспечивается сочетанием зернограницного, дисперсионного (карбидного) и дисперсного (оксидного) упрочнений;

- перспективной фазой для дисперсного упрочнения является оксид Al_2O_3 , образующийся в результате взаимодействия алюминия с легирующим оксидом MoO_3 , имеющего место при реализации технологии, основанной на реакционном механическом легировании (РМЛ);

- дисперсионное упрочнение эффективно обеспечивают карбиды железа, хрома и молибдена, а также интерметаллиды;

- исходные порошковые композиции для получения жаропрочных сталей различного функционального назначения, имеющих температуру рекристаллизации выше 1000 °С, должны содержать легирующие металлы, способные образовывать термодинамически стабильные фазы с высоким значением модуля сдвига (оксиды и карбиды), с одной стороны, а также кислородосо-

держивающее соединение с высоким значением энергии Гиббса образования и углерод, с другой.

Исходя из данных, приведенных во введении, для достижения поставленной цели оптимальными являются композиции на основе системы «железо–легирующие металлы Al, Cr, имеющие высокое сродство к О и С, – оксид с низкой термодинамической стабильностью MoO_3 и С». Согласно термодинамическим расчетам при реализации технологического процесса в этом случае наблюдаются механически и термически активируемые взаимодействия между металлами, с одной стороны, и кислородом, углеродом, с другой. Главными продуктами превращений являются оксиды, карбиды легирующих металлов, имеющие большую термодинамическую стабильность и высокое значение модуля сдвига.

Основой шихты являлся порошок железа – ПЖ2М2 (ГОСТ 9849-74). Легирующими добавками служили порошки технического углерода – ПМ-100 (ГОСТ 7885-77), никеля – ПНК-ОНТ2 (ГОСТ 9722-79), алюминия – ПА-4 (ГОСТ 6058-73), а также порошки хрома и оксида молибдена MoO_3 марки «Ч». Исходные шихты содержали в значительном количестве примеси. Основные из них – углерод и кислород. Так, концентрация последних в порошке железа и никеля составляла примерно 0,20 % каждого. Наличие этих элементов учитывалось при проектировании состава материалов.

Реакционное механическое легирование осуществлялось в энергонапряженной вибромельнице (механореакторе) по оптимальному режиму. Исследования структурных и фазовых превращений проведены на материалах, полученных обработкой шихты в течение 16 ч. Условия механического легирования, оборудование, приборы и методики исследования представлены в [1, 5].

Результаты исследования и их обсуждение

Механически активируемые фазовые превращения в многокомпонентных композициях исследованы на наиболее типичных системах, широко применяемых при производстве сталей. Компонентный состав композиций шихты, а также равновесный и фазовый составы механически легированных композиций приведены в табл. 1 [1, 5, 6]. В исходную шихту первой системы в количестве 0,2 % дополнительно вводился технический углерод ПМ-100. С учетом наличия этого элемента в виде примеси общее содержание углерода равнялось

0,4 %. Концентрация углерода во всех остальных композициях соответствовала его содержанию в виде примеси и составляла примерно 0,2 %.

Превращения в системе «Fe–Cr (13)–C (0,4)». Дополнительное введение в шихту, состоящую из порошков железа и технического хрома, 0,2 % порошка технического углерода ПМ-100 не оказывает принципиального влияния на механически активируемые превращения, наблюдающиеся при обработке композиции в механореакторе, что указывает на одинаковый механизм их протекания.

Табл. 1. Состав композиций

Легировующий компонент шихты, %	Фазовый состав материала	
	после механического легирования	равновесный
Cr(13); C(0,2)	Fe_α ; $Fe_\alpha(C)$; $Fe_\gamma(C)$; (Fe, Cr); Fe_2C	$Fe_\alpha(Cr)$; Cr_7C_3
Cr(13); $MoO_3(6)$	Fe_α ; $Fe_\alpha(C)$; $Fe_\gamma(C)$; (Fe, Cr); Fe_3Mo ; Fe_2C	$Fe_\alpha(Cr, Mo)$; Cr_2O_3 ; Cr_7C_3
Cr(13); Al(3); $MoO_3(6)$	Fe_α ; $Fe_\alpha(C)$; $Fe_\gamma(C)$; (Fe, Cr); Fe_3Mo ; FeAl; Fe_2C	$Fe_\alpha(Cr, Mo)$; Al_2O_3 ; Cr_2O_3 ; Cr_7C_3
Al(3); $MoO_3(6)$	Fe_α ; $Fe_\alpha(C)$; Fe_3Mo ; FeAl	$Fe_\alpha(Mo, Al)$; Al_2O_3
Cr(18), Ni(10)	$Fe_\gamma(Cr, Ni)$; $Fe_\alpha(Ni)$; $Fe_\alpha(C)$; (Fe, Cr); $FeNi_3$; Fe_2C ; Ni	$Fe_\gamma(Cr, Ni)$; Cr_7C_3
Cr(18), Ni(10); $MoO_3(6)$	$Fe_\gamma(Cr, Ni)$; $Fe_\alpha(Ni)$; $Fe_\alpha(C)$; (Fe, Cr); Fe_3Mo ; $FeNi_3$; Fe_2C ; Ni	$Fe_\gamma(Cr, Ni, Mo)$; Cr_2O_3 ; Cr_7C_3
Cr(18), Ni(10); Al(3); $MoO_3(6)$	$Fe_\gamma(Cr, Ni)$; $Fe_\alpha(Ni)$; $Fe_\alpha(C)$; (Fe, Cr); Fe_3Mo ; $FeNi_3$; Ni_3Al ; Fe_2C ; Ni	$Fe_\gamma(Cr, Ni, Mo)$; Al_2O_3 ; Cr_2O_3 ; Cr_7C_3

Как и в механически легированной композиции, состоящей из порошков железа и хрома [7] в рассматриваемой системе (табл. 2), установлено наличие феррита, мартенсита, аустенита, промежуточного соединения (Fe, Cr) и цементита. Содержание углерода в мартенситах достигает $\approx 1\%$ ($C_{0,09}Fe_{1,91}$). Кроме того, установлено наличие карбида Fe_2C . Количественная оценка содержания фаз указывает на увеличение в тройной композиции, по сравнению с двойной, концентрации мартенсита с 6 до 21 %, аустенита с 6 до 8 % и уменьшение количества феррита. Рост количества аустенита остаточного объясняется влиянием

углерода на положение точек M_n и M_k мартенситной диаграммы.

После обработки шихты в механореакторе параметр решетки основной фазы (феррита) равен 0,2863 нм, что несколько меньше, чем у эталона (0,2866 нм). Функция физического уширения (ФФУ) $\beta_{1/2}$ равна 2,0626 рад, относительная среднеквадратическая микродеформация ОСМД $\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle} = 0,679 \cdot 10^{-3}$, плотность дислокаций в объеме кристалла $\rho = 3,3745 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Степенное распределение ОСМД позволяет сделать вывод о формировании блочной структуры.

Табл. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа механически легированной композиции «Fe–Cr (13)–C (0,4)»

2-Theta	D-Spacing	Intensity	Width	Confidence	Matches
30,660	2,9135	3	0,600	100 %	(Fe, Cr)
31,425	2,8443	4	0,600	100 %	(Fe, Cr)
37,761	2,3804	4	0,363	45,9 %	Fe ₃ C
39,669	2,2702	6	0,600	100 %	Fe ₃ C
43,203	2,0923	10	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, γ -Fe
43,610	2,0737	33	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, γ -Fe
44,596	2,0301	237	0,521	100 %	(Fe, Cr), Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
44,633	2,0285	289	0,600	100 %	(Fe, Cr) Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
44,666	2,0271	291	0,600	100 %	(Fe, Cr) Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
44,748	2,0236	68	0,600	100 %	(Fe, Cr) Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
45,354	1,9980	57	0,600	100 %	(Fe, Cr), Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C
45,993	1,9717	10	0,600	100 %	Fe ₃ C
48,949	1,8593	1	0,600	100 %	Fe ₃ C
50,787	1,7962	1	0,600	100 %	γ -Fe(C)
54,350	1,6866	5	0,407	68,0 %	Fe ₃ C
55,373	1,6578	1	0,600	100 %	(Fe, Cr), Fe ₃ C
59,995	1,5407	1	0,600	100 %	Fe ₃ C
61,114	1,5151	1	0,600	100 %	Fe ₃ C
61,778	1,5004	2	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C
64,693	1,4397	7	0,762	58,3 %	(Fe, Cr), Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
65,868	1,4168	7	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C
66,138	1,4117	5	0,600	100 %	Fe ₃ C
66,471	1,4054	4	0,600	100 %	Fe ₃ C
70,863	1,3287	2	0,600	100 %	Fe ₃ C
72,239	1,3067	1	0,352	21,3 %	Fe ₃ C
74,785	1,2684	3	0,600	100 %	Fe ₃ C, γ -Fe(C)
76,594	1,2429	2	0,600	100 %	Fe ₃ C
76,729	1,2411	1	0,298	6,0 %	Fe ₃ C
78,031	1,2236	2	0,305	0,0 %	Fe ₃ C
78,965	1,2114	2	0,298	16,0 %	Fe ₃ C
79,165	1,2089	2	0,600	100 %	(Fe _{1,91} C _{0,09}), Fe ₃ C
79,899	1,1996	4	0,600	100 %	B Fe ₃ C
81,029	1,1857	10	0,600	100 %	Fe ₃ C
82,441	1,1689	22	0,530	96,7 %	(Fe, Cr), Fe _{1,91} C _{0,09} , Fe ₃ C, α -Fe
83,531	1,1564	7	0,600	100 %	Fe ₃ C
88,849	1,1004	3	0,600	100 %	Fe ₃ C
89,866	1,0906	3	0,600	100 %	γ -Fe(C)

Окончание табл. 2

2-Theta	D-Spacing	Intensity	Width	Confidence	Matches
90,039	1,0890	2	0,321	27,2 %	γ -Fe(C)
95,623	1,0396	1	0,311	4,3 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , γ -Fe
96,780	1,0302	1	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , γ -Fe
98,827	1,0143	5	0,582	63,7 %	(Fe, Cr) Fe _{1,91} C _{0,09} , α -Fe
109,153	0,9453	2	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09}
110,385	0,9381	1	0,308	5,3 %	Fe _{1,91} C _{0,09}
115,948	0,9086	3	0,388	34,6 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , α -Fe
117,521	0,9009	2	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09} , γ -Fe α -Fe
135,124	0,8334	2	0,600	100 %	Fe _{1,91} C _{0,09}
136,672	0,8288	5	0,423	63,5 %	α -Fe
138,665	0,8233	2	0,340	29,7 %	α -Fe

Механически легированные композиции характеризуются высокой

твердостью (табл. 3), достигающей 780 HV.

Табл. 3. Твердость многокомпонентных гранулированных композиций на основе железа

Легировующий компонент, %	Твердость, HV, после	
	механического легирования	механического легирования и отжига (1000 °С, 2 ч)
Cr(13); C(0,4)	780	395
Cr(13); MoO ₃ (6)	710	420
Cr(13); Al(3); MoO ₃ (6)	720	500
Al(3); MoO ₃ (6)	670	460
Cr(18), Ni(10)	620	410
Cr(18), Ni(10); MoO ₃ (6)	640	450
Cr(18), Ni(10); Al(3); MoO ₃ (6)	700	490

Высокая стойкость против отжига (395 HV) при температурах, достигающих 1000 °С, указывает на наличие дисперсного упрочнения. Наиболее вероятной упрочняющей фазой является оксид Cr₂O₃, находящийся в наноструктурном рентгеноаморфном состоянии.

Преобразования в системе «Fe–Cr (18)–Ni (10)». Согласно данным рентгеноструктурного анализа гранулированная композиция, полученная обработкой в механореакторе шихты, состоящей из порошков железа, хрома

(18 %) и никеля (10 %), имеет сложный фазовый состав, включающий: твердые растворы легировующих элементов в железе – феррит, мартенсит, аустенит; сверхструктуру – (Fe, Cr); интерметаллид – FeNi₃; карбид – Fe₂C; никель. Количество феррита – примерно 35 %. Эта фаза легирована никелем и, вероятно, хромом. На растворение никеля в α -железе указывает увеличение параметра кристаллической решетки с 0,28664 до 0,28693 нм. Аустенит легирован как никелем, так и хромом и опи-

сывается формулой $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$. Растворение никеля и хрома в γ -железе приводит к уменьшению параметра кристаллической решетки с 0,35911 (эталон) до 0,35765 нм. Количество аустенита составляет $\approx 40\%$. Содержание мартенсита с концентрацией углерода около 0,9 % достигает 15 %. Сверхструктура – σ -фаза (Fe, Cr), интерметаллид – FeNi_3 , элементарный никель присутствуют примерно в равных количествах.

Плотность дислокаций, распределение которых описывается степенной моделью, составляет $2,0427 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Гранулированная композиция имеет высокую микротвердость, равную 620 HV, снижающуюся до 410 HV после отжига при 1000 °C (см. табл. 3). Высокая стойкость против длительного высокотемпературного воздействия обусловлена наличием дисперсного упрочнения, связанного с образованием наноструктурных включений оксидов хрома, находящихся в рентгеноаморфном состоянии.

Превращения в композициях на основе системы «Fe–легирующий металл, обладающий высоким сродством к кислороду (Cr и/или Al), – MoO_3 (б)». Составы исследованных композиций приведены в табл. 1. Как отмечалось выше, оксид MoO_3 во всех случаях вводился в композицию в качестве поставщика кислорода. При этом, исходя из равновесной термодинамики, он должен взаимодействовать с металлом, имеющим высокое сродство к кислороду (Cr и/или Al). Один из продуктов этого взаимодействия – термодинамически стабильный оксид (Cr_2O_3 , Al_2O_3) – основная упрочняющая фаза.

Характерной особенностью фазового состава механически легированных композиций, содержащих в исходной шихте MoO_3 , является наличие фазы Fe_3Mo . Количество ее зависит от состава шихты и находится в пределах 4...8 %. Согласно расчетам в случае полного восстановления молибдена из

оксида MoO_3 и при взаимодействии его с железом с образованием Fe_3Mo количество последнего должно составлять примерно 11 %. Минимальное содержание Fe_3Mo находится в композициях, легированных хромом, максимальное – хромом и алюминием. Присутствие этой фазы однозначно указывает на протекание механически активируемых окислительно-восстановительных превращений с образованием оксида металла, имеющего высокое сродство к кислороду, и молибдена с последующим взаимодействием его с железом.

Более полное протекание механически активируемых окислительно-восстановительных превращений в композициях с алюминием, по сравнению с композициями, легированными хромом, обусловлено меньшим значением энергии Гиббса образования оксида Al_2O_3 , чем Cr_2O_3 , что дополнительно подтверждает достоверность ранее установленной закономерности влияния термодинамического фактора на скорость механически активируемых превращений [1, 5, 8, 9].

Наряду со взаимодействием с оксидом MoO_3 некоторая часть алюминия растворяется в α -железе, а также образует с последним соединение FeAl . В композициях, содержащих никель, вместо алюминидов железа формируется алюминид никеля Ni_3Al .

Во всех механически легированных композициях с MoO_3 , так же, как и без него, присутствуют фазы феррит, аустенит и мартенсит. Основные фазы (феррит и аустенит) характеризуются высокой плотностью дислокаций, находящейся в пределах $8 \cdot 10^{11} \dots 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Исходя из распределения относительной среднеквадратической микродеформации (ОСМД) в кристаллитах, описываемого степенной зависимостью, зерна этих фаз имеют блочное строение. Гранулированные композиции обладают высокой микротвердостью, находящейся в пределах 640...720 HV (см. табл. 3). Минимальную твердость име-

ют материалы, легированные хромом и никелем с преобладающим содержанием в структуре аустенита. Гранулированные композиции характеризуются высокой жаропрочностью. После отжига при 1000 °С их микротвердость находится в пределах 410...500 НВ. Высокая жаропрочность композиций обусловлена дисперсным упрочнением наноразмерными частицами оксидов хрома и алюминия, синтезирующихся в процессе реализации технологии.

При прочих равных условиях легирование алюминием приводит к увеличению жаропрочности, что объясняется более полным протеканием окислительно-восстановительных превращений, а также большей термодинамической и «механической» стабильностью оксида Al_2O_3 по сравнению с оксидами хрома.

Формирование структуры основы. Анализ кинетики изменения тонкой структуры основы железных композиций, подвергнутых механическому легированию (рис. 1), позволяет сделать

вывод, что измельчение зерен при обработке шихты в механореакторе подчиняется общей закономерности, характерной для металлических систем, и происходит в результате протекания процесса динамического возврата (динамической рекристаллизации) [1, 10]. На начальной стадии размол в частицах наблюдается увеличение дефектности кристаллического строения. В течение 1...2 ч обработки в механореакторе плотность дислокаций повышается до значений не ниже 10^{12} см^{-2} . Достигнув критической величины, они перестраиваются, образуя соответствующие субструктуры, и плотность их уменьшается. При большой плотности дефектов возникают фрагментированные зерна. С увеличением степени деформации размер фрагментов уменьшается, а угол разориентировки между ними возрастает. Границы между фрагментами становятся большеугловыми. Результат превращений – структура, подобная структуре динамической рекристаллизации.

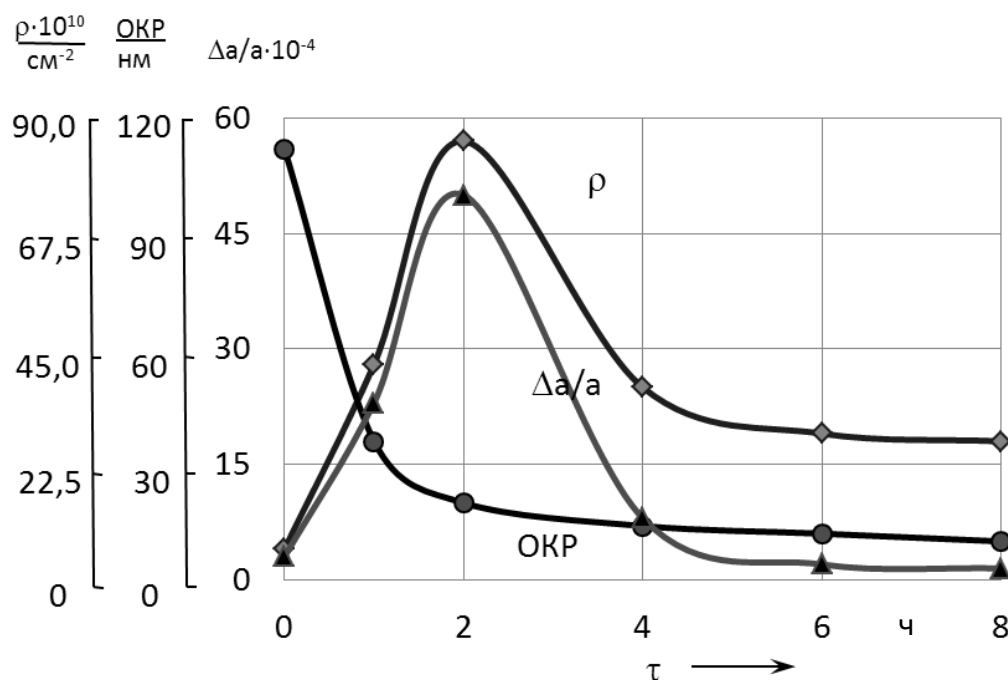


Рис. 1. Влияние продолжительности МЛ на параметры тонкой структуры гранулированной композиции «Fe-Cr (18 %)-MoO₃(6 %)»

Основа механически легированных железных систем является твердым раствором элементов, входящих в состав легирующих компонентов в железе. Механически активируемая фрагментация приводит к измельчению кристаллитов до значений, не превышающих 100 нм. Размер ОКР составляет 10...20 нм. Субмикроструктурная структура с большой протяженностью поверхности раздела между компонентами способствует образованию центров кристаллизации упрочняющих фаз и ускоряет процесс их формирования.

Как и ранее изученные алюминиевые, медные и никелевые системы [1, 11, 12], механически легированные железные композиции являются комплексно-упрочненными, термодинамически неравновесными системами. Термически активируемые превращения, имеющие место при отжиге, не оказывая заметного влияния на структуру, по фазовому составу приближают механически легированные композиции к термодинамическому равновесию, но не достигают его. Преобладающим типом упрочнения как в механически легированных композициях, так и подвергнутых последующей термической обработке является зернограницный. Основная роль механически и термически синтезированных наноструктурных упрочняющих фаз заключается в стабилизации границ зерен и субзерен.

Выводы

1. При механическом легировании многокомпонентных композиций, являющихся основой для производства жаропрочных перлитных, мартенситных, ферритных, аустенитных сталей, протекают фазовые превращения, уменьшающие свободную энергию систем, но не обеспечивающие достижения их равновесного состояния. В зависимости от состава исходной шихты продукт механически активируемых превращений – твердые растворы и соеди-

нения, включающие интерметаллиды, оксиды и карбиды.

2. Основа механически легированных железных систем является твердым раствором элементов, входящих в состав легирующих компонентов в железе. Механически активируемая фрагментация приводит к измельчению кристаллитов до значений, не превышающих 100 нм. Размер ОКР составляет 10...20 нм. Субмикроструктурная структура с большой протяженностью поверхности раздела между компонентами способствует образованию центров кристаллизации упрочняющих фаз и ускоряет процесс их формирования.

3. Термически активируемые превращения, имеющие место при отжиге, не оказывая заметного влияния на структуру, по фазовому составу приближают механически легированные композиции к термодинамическому равновесию, но не достигают его.

4. Высокая жаропрочность материалов достигается сочетанием зернограницного, дисперсионного (интерметаллидного, карбидного) и дисперсного (оксидного) упрочнений; дисперсионное упрочнение эффективно обеспечивают карбиды железа, хрома и молибдена, а также интерметаллиды; перспективной фазой для дисперсного упрочнения является оксид Al_2O_3 .

5. Для получения жаропрочных сталей, имеющих температуру рекристаллизации выше 1000 °С, оптимальными являются композиции на основе системы «железо–легирующие металлы Al, Cr, имеющие высокое сродство к O и C, – оксид с низкой термодинамической стабильностью MoO_3 и C».

6. Преобладающим типом упрочнения как в механически легированных композициях, так и подвергнутых последующей термической обработке является зернограницный. Основная роль механически и термически синтезированных наноструктурных упрочняющих фаз заключается в стабилизации границ зерен и субзерен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко . – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
3. **Верятин, У. Д.** Термодинамические свойства неорганических веществ : справочник / У. Д. Верятин, В. П. Маширев, Н. Г. Рябцев. – М. : Атомиздат, 1965. – 460 с.
4. **Смитлз, К. Дж.** Металлы / К. Дж. Смитлз. – М. : Metallurgia, 1980. – 447 с.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий: монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 216 с.
6. **Ловшенко, Г. Ф.** Термодинамическое моделирование фазовых превращений при реакционном механическом легировании композиций на основе железа и никеля / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 109–118.
7. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования структуры и фазового состава двухкомпонентных механически легированных композиций на основе железа / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Литье и металлургия. – 2015. – № 1. – С. 81–90.
8. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств при механическом легировании двойных алюминиевых композиций / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Наука и техника. – 2015. – № 1. – С. 3–13.
9. **Ловшенко, Ф. Г.** Анализ фазовых и структурных превращений при механическом легировании систем на основе меди / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 30–41.
10. **Ловшенко, Г. Ф.** Закономерности и механизм формирования структуры основы механически легированных композиций на базе металлических систем / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко // Литье и металлургия. – 2014. – № 4. – С. 88–98.
11. **Витязь, П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : Беларус. навука, 1998. – 352 с. : ил.
12. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля: монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : БНТУ, 2012. – 297 с.

Статья сдана в редакцию 23 марта 2015 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел. +375-296-25-21-26.

Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc, Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-25-21-26.

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc, Professor, Belarusian National Technical University. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

УДК 621.791

Б. Г. Маслов, А. П. Выборнов

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ И НАВЫКОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

UDC 621.791

B. G Maslov, A. P. Vybornov

VALIDATION TESTS FOR ASSESSING MACHINERY SPECIALISTS' QUALIFICATION

Аннотация

В настоящее время работодателям в области машиностроения требуются квалифицированные специалисты. Для установления правильных взаимоотношений работодателя с техническим специалистом целесообразно произвести количественную оценку знаний, умений и навыков последнего. Разработанные контрольно-измерительные материалы (КИМ) позволяют оценить как специалистов «горячих» специальностей (литьё, сварка), так и «холодных» (механическая обработка, машиностроительная сборка). Рассмотрена общая структура таких материалов. Приведены особенности КИМ для «горячих» и «холодных» специальностей.

Ключевые слова:

количественная оценка, квалификация, тест, «горячая» обработка, «холодная» обработка.

Abstract

Currently, employers in the engineering sector require skilled professionals. To establish correct relations between an employer and a technical specialist it is advisable to perform quantitative assessment of his knowledge, abilities and skills. Tests for realizing such quantitative assessment were developed. They allow making an assessment of specialists representing both «hot» professions (casting, welding), and «cold» professions (machining, machine-building assembly). The structure of such materials is considered. The features of validation tests for «hot» and «cold» fields are given.

Key words:

quantification, qualification, test, «hot» treatment, «cold» treatment.

Главной задачей профессиональной подготовки в технических вузах является выпуск специалистов, востребованных работодателями в промышленности. В идеальном случае это означает, что выпускник вуза должен отвечать требованиям профессиональных стандартов (ПС). Однако на сегодняшний день в Российской Федерации ПС в области техники и технологий только начинают разрабатывать. Требования, которые должны предъявляться к специа-

листу и содержаться в таких стандартах, могут быть сформулированы на основе образовательных стандартов (ФГОС ВО) и квалификационных справочников. Проверку выпускника вуза на соответствие требованиям можно провести, используя специальные контрольно-измерительные материалы (КИМ) для оценки уровня его профессиональной подготовки путем тестирования. При существующей практике подготовки рекомендуется на добровольной основе

применять КИМ в качестве входного контроля перед защитой выпускниками итоговых квалификационных работ. Таким образом удастся получить количественную оценку уровня профессиональной подготовки выпускника для решения им профессиональных задач в конкретной области деятельности. Иными словами, это может быть рассмотрено, как сертификация специалиста.

Вышеописанная процедура была бы привлекательна работодателю при выстраивании его отношений с работником при приёме на работу, продвижении по карьерной лестнице, увольнении и т. п. Связано это в первую очередь с тем, что современная подготовка инженерных кадров сильно разнится от вуза к вузу, появилась и внедряется новая двухуровневая система подготовки по схеме «бакалавр–магистр», выпускники которой ещё не являются специалистами в традиционном смысле.

При таком положении дел работодателю при решении кадровых вопросов было бы удобно проверять профессиональные знания, умения и навыки специалиста с помощью тестов на соответствие требованиям образовательных и профессиональных стандартов. Результаты проверки предоставят работодателю дополнительную информацию, которая позволит более обоснованно решать кадровые вопросы на предприятиях. Следует отметить, что и у самого работника (специалиста) с практическим опытом работы может появиться по разным причинам необходимость оценки своего квалификационного уровня и получения соответствующего сертификата. Следовательно, при возникновении системы оценки знаний и сертификации квалификаций специалистов эти материалы будут востребованы.

КИМ для оценки квалификации (сертификации) выпускников технических вузов и работающих специалистов (инженеров-технологов) должны иметь единую структуру и включать следующие

разделы:

- общепрофессиональная подготовка;
- способы изготовления изделий в машиностроении и технологическое машиностроительное оборудование;
- конструкционные материалы, основные типы конструкций и элементы расчета;
- организация проведения работ, пути обеспечения качества продукции, сертификация технологии, материалов, оборудования и персонала машиностроительного производства;
- требования по безопасности проведения работ, отраслевая нормативно-техническая и нормативно-технологическая документация (НТ).

Сертификацию необходимо проводить в соответствии с методикой сертификации [1], используя вопросники.

Вопросник первого субтеста (30 % общей оценки) сгруппирован по следующим темам:

- 1) общая инженерная эрудиция;
- 2) способы изготовления изделий;
- 3) применяемые материалы;
- 4) технологическое оборудование;
- 5) конструкции, их основные типы и элементы расчета;
- 6) организация проведения и пути обеспечения качества продукции;
- 7) сертификация технологии, материалов, оборудования и персонала;
- 8) требования по безопасности проведения работ.

Таким образом можно определить инженерную подготовку кандидата и его инженерную эрудицию.

Второй субтест (40 % общей оценки) посвящён знанию нормативно-технической и нормативно-технологической документации (НТД), действующей в отрасли. Вопросы объединены в следующие кластеры:

- требования НТД, предъявляемые к оборудованию и материалам;
- требования НТД, предъявляемые к технологическим операциям;
- требования НТД, предъявляемые к качеству работ и продукции;

– организация и проведение работ в соответствии с требованиями НТД.

При тестировании уже работающих специалистов могут быть использованы те документы, которые применяют на конкретном предприятии.

Следовательно, по результатам этого субтеста можно будет судить об умениях кандидата работать с нормативной документацией, действующей в отрасли.

Третий субтест (30 % общей оценки) представляет собой комплексное задание в виде письменной разработки кандидатом одной или нескольких методик проведения работ по изготовлению конкретных изделий в том промышленном секторе, в котором происходит производственная деятельность кандидата. В этот субтест должны быть включены описания всех технологических операций и параметров согласно установленным нормативным документам и стандартам. Практический экзамен имеет такую продолжительность и степень сложности, чтобы позволить кандидату подтвердить свою способность применять на практике полученные навыки в выполнении работ по организации, руководству и техническому контролю.

Для проверки практических навыков кандидата на третьем субтесте специалистам предлагается осветить следующие вопросы:

- 1) характеристика изделия;
- 2) обоснование технологии изготовления изделия и его отдельных элементов;
- 3) обоснование выбора оборудования;
- 4) обоснование выбора технологической оснастки;
- 5) расчет технологических параметров;
- 6) обоснование выбора метода (методов) и объемов контроля изделия;
- 7) разработка комплекса мероприятий по обеспечению выполнения

требований по защите окружающей среды;

8) разработка комплекса мероприятий по обеспечению выполнения требований по безопасности труда.

В зависимости от должности специалиста не все вопросы могут входить в задание. Так, например, для лиц, которые являются руководителями рабочих бригад, важна не разработка технологий, а организация производственного процесса и контроль исполнения технологической документации, для инженеров-технологов – разработка технологии изготовления изделия. Руководители служб должны владеть навыками решения всех вышеперечисленных вопросов.

Процедура сдачи квалификационных экзаменов рассчитана на 1...2 дня. Правильные ответы на вопросы субтестов оценивают по балльной системе: вопросы первого субтеста – по 1 баллу, второго – по 2 балла, третьего – от 1 до 4 баллов. Нормативные значения баллов должен устанавливать работодатель.

Это положение применимо в первую очередь к инженерным кадрам, занятым в «горячей» обработке – литье, сварка, обработка давлением. Структура КИМ для таких специальностей подробно была описана в [2], там же приведены результаты тестирования студентов (дипломников и пятикурсников) нескольких вузов и специалистов в области сварки, которые показали, что использование КИМ эффективно.

Аналогичные материалы для специалистов «холодной» обработки – механообработка и сборка – в целом имеют такую же структуру, но тематика тестов несколько разнится в силу своей специфики [3].

Оценка квалификации специалистов в области технологии машиностроения имеет две важные особенности.

Во-первых, анализ требований к квалификации специалистов на машиностроительных предприятиях показал, что компетенции на различных уровнях

отличаются в основном не содержанием решаемых задач, а сложностью объекта производства, на который они направлены.

Вторая же особенность заключается в огромном многообразии этих объектов производства, имеющих существенные различия для разных отраслей машиностроительной промышленности. Кроме того, процесс реализации многих компетенций специалиста в области технологии машиностроения носит творческий характер, подразумевающий многовариантность принимаемых технологических решений.

Процесс оценки квалификации предусматривает последовательное проведение трех квалификационных экзаменов: общего теоретического, специального теоретико-практического и практического.

Итоговая оценка формируется как сумма оценок по всем трем экзаменам.

Квалификацию определяют по суммарной оценке. Нормативные значения баллов должен устанавливать работодатель.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая структура контрольно-измерительных материалов для оценки квалификации выпускников позволит получать количественную оценку уровня их профессиональной подготовки для решения ими профессиональных задач в конкретной области деятельности.

2. Контрольно-измерительные материалы, разработанные в соответствии с предложенной структурой, могут быть использованы работодателями при выстраивании своих отношений с работниками (при приеме на работу, продвижении по карьерной лестнице, увольнении и т. п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунов, С. В. Методика оценки профессиональных квалификаций в машиностроении / С. В. Коршунов, Б. Г. Маслов // Технология машиностроения. 2012. – № 11. – С. 25–28.
2. Выборнов, А. П. Количественная оценка квалификации специалистов в области машиностроения / А. П. Выборнов, А. М. Зарубин // Технология машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 70–73.
3. Спиридонов, О. В. Сертификация инженерных кадров в области технологии машиностроения / О. В. Спиридонов // Энцикл. справочник с Приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2013. – № 12. – С. 17–21.

Статья сдана в редакцию 15 января 2015 года

Борис Георгиевич Маслов, канд. техн. наук, доц., Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Андрей Петрович Выборнов, канд. техн. наук, доц., Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Boris Georgiyevich Maslov, PhD (Engineering), Associate Prof. Bauman Moscow State Technical University.

Andrey Petrovich Vybornov, PhD (Engineering), Associate Prof. Bauman Moscow State Technical University.

УДК 621.791: 378.162.36

М. В. Мельник

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБУЧЕНИЯ УЧАЩИХСЯ РАБОЧЕЙ ПРОФЕССИИ
СВАРЩИК С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРОЧНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ
(ИМИТАТОРОВ)**

UDC 621.791: 378.162.36

M. V. Melnik

**IMPROVEMENT OF WELDING STUDENTS TRAINING WITH THE USE
OF WELDING SIMULATORS (IMITATORS)**

Аннотация

Приведен анализ основных характеристик современных сварочных тренажеров отечественных и зарубежных производителей. Предложена методика совершенствования обучения учащихся рабочей профессии сварщик с применением сварочных тренажеров.

Ключевые слова:

сварка, сварочные тренажеры, технические средства обучения, аттестация сварщиков.

Abstract

The analysis of basic characteristics of modern welding training simulators of domestic and foreign producers is done. The methodology to improve students' training in welding trade with the use of welding training simulator is offered.

Key words:

welding, welding training simulators, training facilities, certification of welders.

Введение

Сварка является одним из важнейших технологических процессов в современной промышленности. Ручная дуговая сварка в настоящее время остается одним из основных и распространенных способов получения неразъемных соединений. Развитие и усложнение строительного комплекса, применение современных конструкций и материалов, внедрение европейских и международных стандартов требует высокой квалификации персонала. Рабочие-сварщики должны обладать знаниями, умениями и навыками в соответствии с профессионально-квалификационной характеристикой, грамотно перерабатывать информацию, что особенно важно

при возникновении сложных, в том числе аварийных, ситуаций, уметь быстро принимать решения по устранению неполадок [1]. При выполнении ручной дуговой сварки до 40...50 % брака возникает из-за неэффективного управления процессом вследствие низкой квалификации и плохой подготовки сварщиков, поэтому важным является эффективное обучение квалифицированных сварщиков ручной дуговой сварки [2].

Недостаток квалифицированных сварщиков и специалистов сварочного производства приводит к ухудшению качества работ. Снижение этого дефицита возможно только при условии повышения эффективности профессионального образования и модернизации

процесса подготовки сварщиков и специалистов по сварке [3] с применением современных информационных технологий [4].

Появление тренажеров, основанных на технологии виртуальной реальности, позволяет более качественно обучать учащихся рабочей профессии сварщик. При этом сокращаются время и затраты на практическое обучение.

Основная часть

До настоящего времени теоретическую подготовку, как правило, осуществляют путём аудиторных занятий, при этом учебные планы строят по модульному принципу с обязательным контролем знаний и умений, полученных на занятиях, по каждому модулю и окончательным экзаменом (зачетом) после завершения полного курса теоретической подготовки.

В последние годы наблюдается интенсивный поиск новых, базирующихся на компьютерных мультимедийных технологиях методик, форм и средств обучения сварщиков и специалистов сварочного производства. Применение таких технологий существенно расширяет возможности индивидуального обучения и самостоятельного приобретения знаний обучающимися, обеспечивает возможность дистанционного общения с преподавательским составом учебных заведений через Интернет, получения необходимой информации не только в виде текстов, но и в виде анимаций, видеофильмов [5]. Разработка методик и средств обучения сварщиков и специалистов в области сварки и родственных технологий с применением компьютерных технологий, интерактивных досок и других современных мультимедийных средств обучения ведется в России (НАКС, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ВолгГТУ, ДГТУ и др.), в Украине (ИЭС им. Е. О. Патона, Институт новых технологий в образовании и др.), в странах Европейского союза, Китае, Бразилии,

Японии, Австралии и др. Наиболее значимые результаты совершенствования системы подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства получены в Германии [6]. Разработанные там методики и средства обучения имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими: индивидуальный выбор времени, вида и темпа обучения, сокращение его стоимости, возможность обучения и повышения квалификации без отрыва от работы, унификация требований к качеству продукции сварочного производства со взаимопризнанием различных систем аттестации и подготовки специалистов.

Актуальным на сегодняшний день является совершенствование процесса обучения операторов-сварщиков ручной дуговой сварки, снижение затрат, повышение качества подготовки специалиста рабочей профессии сварщик, а также сокращение времени на обучение путем совмещения (без переналадки) традиционных программ подготовки и нового программного модуля (мультимедиа). Наиболее перспективными в процессе совершенствования подготовки специалистов по сварке являются методы, базирующиеся на современных информационных технологиях, позволяющие не только моделировать перемещение электрода в трехмерном пространстве, проводить виртуальный процесс сварки, но и получать качественные сварные соединения [2].

В настоящее время информационные технологии в области сварки эффективно развиваются по следующим направлениям:

- разработка и практическое использование электронных учебников;
- применение для самоподготовки или получения допуска к работе программ тестирования для проверки знаний;
- применение сварочных тренажеров для практического обучения приемам сварки.

Сварочные тренажеры являются лишь имитаторами. Их применение целесообразно только совместно с классическими средствами обучения. Изменения необходимо вносить не только в методику проведения занятий, но и в излагаемый материал в рамках специальности. По мнению автора, совмещение известных методов обучения и новых, связанных с современными технологиями, создает условия для лучшего усвоения знаний обучающихся по специальности сварщик. Целесообразно добавить теоретический курс в начале обучения с применением сварочных тренажеров (с помощью мультимедиа показать, как происходит процесс сварки, как правильно формируется сварной шов, каковы металлургические процессы при сварке, особенности поведения сварочной ванны, существующие дефекты).

Для улучшения качества обучения следует:

- разработать методику проведения лабораторных занятий с использованием технических средств обучения;
- применить в процессе обучения электронные учебники;
- разработать электронную базу с наиболее известными марками сталей и сплавов, свариваемых ручной дуговой сваркой;
- опробовать и внедрить в процесс обучения сварочные тренажеры или симуляторы по сварке, предназначенные для манипулирования сварочной дугой;
- оценить необходимость применения указанных технических средств обучения в подготовке будущих инженеров-педагогов и мастеров производственного обучения.

Согласно [7], в зависимости от уровня специалиста соотношение теоретической и практической подготовки может изменяться в диапазоне от 5...10 и 90...95 % для рабочих-сварщиков, 70 и 30 % для инженеров-сварщиков соответственно.

Обучение сварщиков, повышение их квалификации и поддержание навыков и умений выполнения различных видов сварки с учетом особенностей методов профессиональной подготовки являются весьма сложными, дорогостоящими и энергоемкими процессами, если их выполнять в реальных условиях на сварочном оборудовании с использованием сварочных материалов и образцов [5].

К техническим средствам обучения, которые позволяют усовершенствовать процесс подготовки специалистов по сварке, относятся:

- информационные средства обучения (радиовещание, учебное кино и учебное телевидение, статическая диапроекция);
- средства контроля знаний (тестовые и контролирующие программы и другие компьютерные средства, позволяющие хранить, передавать и проверять правильность усвоения обучающимися информации учебного назначения);
- тренажеры (пакеты прикладных программ, компьютерные тренажеры, лабораторные практикумы, экспертно-обучающие системы и другие компьютерные средства);
- комбинированные средства обучения (замкнутые учебные телевизионные системы, лингафонные кабинеты, компьютерные системы).

Сварочная наука и техника развивается, совершенствуется, и, как следствие, появляется необходимость создания технических средств обучения сварщиков, в частности тренажерно-обучающих устройств и систем. Для повышения качества подготовки специалистов по рабочей профессии сварщик сегодня широко применяются тренажеры (имитаторы).

Тренажер – это симулятор движений сварщика во время выполнения сварочной работы с отображением процесса сварки и полученных результатов. Тренажеры используют для выработки моторных навыков сварщика ручной и

механизированной дуговой сварки. Тренажерные средства применяются в качестве информационно-справочных систем для теоретической подготовки к аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства [8]. По степени имитации процесса сварки тренажеры (имитаторы) подразделяются на компьютерные и искровые. В компьютерных тренажерах имитация сварочной зоны и сварочной дуги происходит с помощью синтеза изображений и приемов машинной графики в виртуальном пространстве [4]. Искровые тренажеры более реально воспроизводят сварочные процессы; особенностью этих тренажеров является обратная аудиовизуальная связь по основным параметрам: углу наклона электрода-имитатора, длине дуги, тепловому режиму ванны.

Институт электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС – Paton Electric Welding Institute) и ИПМЭ им. Г. Е. Пухова НАН Украины разработали в 1981 г. первый в мире дисплейный тренажер сварщика, позволивший впервые оценить на практике перспективность использования информационных технологий при подготовке сварщиков [9] и явившийся прообразом многих тренажеров, разработанных впоследствии.

Работа тренажера основана на имитации средствами электроники основных процессов сварки. При этом проводится количественная оценка технологических параметров, влияющих на качество сварного соединения. Тренажер позволяет:

- оценивать навыки и физиологическое состояние сварщика на основе регистрации точных движений его руки с электрододержателем;
- усложнять или упрощать имитируемую сварочную ситуацию в зависимости от уровня подготовки обучаемого;
- изменять в широких пределах основные параметры сварочного процесса;
- вводить в сценарий подготовки

экстремальные ситуации;

- многократно возвращаться к повторению нужного эпизода;
- получать объективную оценку знаний обучаемого или испытуемого.

Развитие систем тренинга по сварке продолжилось в работах ИЭС и SLV Halle, в 2005 г. GSI mbH представил автоматизированный сварочный тренажер международным специалистам на выставке «Сварка и резка».

Автором проведен анализ характеристик пяти видов сварочных тренажеров отечественных и зарубежных производителей: Fronius Virtual Welding, тренажер сварщика для обучения электросварщиков дуговым способом сварки ТСДС-06М, дуговой тренажер сварщика ДТС-02, малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС-05М, Lincoln Electric VRTEX 360.

Тренажер сварщика для обучения электросварщиков дуговым способом сварки ТСДС-06М применяется в качестве технического средства обучения, предназначен для тренировки, повышения квалификации, тестирования, допускного контроля и аттестации электросварщиков дуговой сварки.

Сварочный тренажер обеспечивает возможность обучения с использованием реальных сварочных образцов, выполняемых ручной дуговой сваркой покрытыми электродами и неплавящимся электродом в среде инертных газов (ТИГ) с подачей присадочной проволоки и без нее.

Тренажер ТСДС-06М позволяет:

- вводить исходные данные сварочного процесса в диалоговом режиме или загружать учебные задания;
- автоматически устанавливать уровень сварочного тока в соответствии со значениями, задаваемыми учебной программой или программой сварщика;
- совершенствовать навыки сварки с использованием реальных сварочных образцов в соответствии с нормативно-технической документацией;
- отображать на экране монитора

компьютера текущие, мгновенные и усредненные значения параметров реальных сварочных процессов, сравнивать возможные отклонения от заданных или нормативных значений;

- выполнять с помощью цифрового индикатора блока контроль текущих численных значений сварочного тока, напряжения дуги, расхода инертного газа при ТИГ-процессе;

- осуществлять обратную связь с обучаемым или тестируемым сварщиком непосредственно во время выполнения процесса сварки путем автоматической подачи речевых сигналов;

- контролировать правильность реализации сварочного процесса и его соответствие нормативным или задан-

ным требованиям по всем и отдельным параметрам;

- осуществлять компьютерную регистрацию и обработку результатов сваренных контрольных образцов; документировать, хранить и воспроизводить эту информацию в цифровом, графическом или табличном виде на оптическом, магнитном и бумажном носителях [10].

Сварочный тренажер Fronius Virtual Welding (рис. 1) на основе технологии виртуальной реальности разрабатывался применительно к процессу полуавтоматической сварки в среде защитного газа с учетом последних достижений в этой области и современных требований.



Рис. 1. Сварочный тренажер Fronius Virtual Welding

Имитация сварки Fronius Virtual Welding основана на эмпирических данных и анализе большого количества выполненных сварных соединений. Для оценки качества сварки и формы сварного шва используются чувствительные датчики системы слежения, определяющие положение горелки, скорость ее перемещения. Система учитывает зависимость формы и качества шва от введенных параметров сварки.

Особенностью использования рассматриваемого сварочного тренажера является возможность обучаться без предварительной подготовки, в условиях, близких к ситуации реальной сварки. Процесс сварки происходит с использованием эргономичной горелки с регулировкой параметров сварки и включает:

- режим теоретического обучения (состоит из трех разделов). Виртуальный учитель, так называемый Ghost,

дает подсказки, указывая оптимальную технику выполнения сварки. Он устанавливает оптимальную скорость сварки, расстояние до заготовки и угол наклона сварочной горелки;

- режим моделирования (включает два раздела). Сначала новичок тренируется выполнять сварку в реальной ситуации без помощи Ghost. Затем учащийся сам выставляет необходимые параметры.

Сопоставимые измеримые результаты обучения дают возможность объективно оценить качество обучения при помощи хорошо разработанной балльной системы [11].

Малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС-05М (рис. 2) дает возможность имитации сварочного процесса путем получения реальной малоамперной дуги при использовании имитаторов сварочных инструментов, выполненных на базе инструментов, применяемых в промышленности. Тренажер предназначен для формирования учащимися моторных навыков зажигания и устойчивого удержания сварочной дуги при осуществлении различных способов сварки (ручная дуговая сварка покрытыми электродами, сварка в среде защитных газов, аргонодуговая сварка).

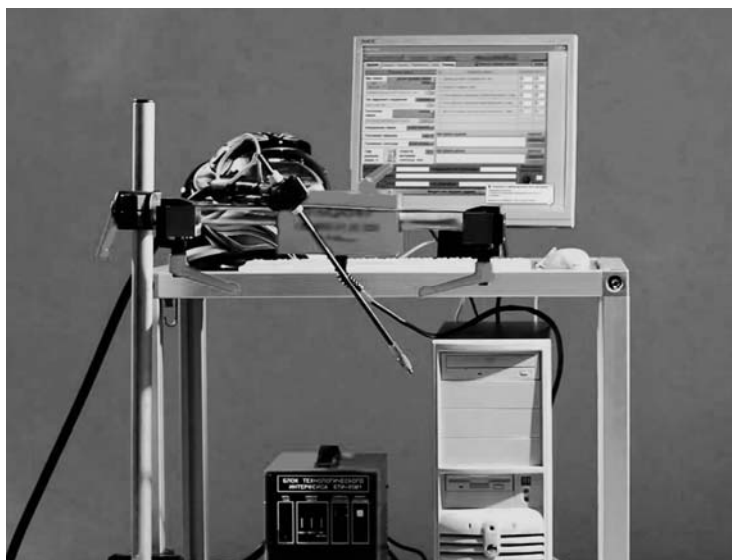


Рис. 2. Малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС-05М

В состав тренажера включены следующие компоненты:

- блок технологического интерфейса, отображающий значения выходных электрических параметров, необходимые для возникновения и устойчивого горения дуги, а также для получения, обработки и передачи на компьютер информационных сигналов;

- манипулятор-позиционер с тремя имитаторами образцов свариваемого изделия, предназначенный для установки сварочного образца и фиксации

его в различных пространственных положениях;

- имитаторы инструмента сварщика, применяющиеся для отработки техники зажигания и поддержания дуги, перемещения сварочного инструмента относительно объекта сварки и формирования навыков выдержки основных параметров процесса ручной дуговой сварки: длины дугового промежутка, скорости сварки, углов наклона электрода;

- маска со стеклом типа «Хаме-

леон», защищающая глаза сварщика-учащегося от излучения сварочной дуги при всех видах сварки путем автоматического затемнения стекла;

- головные телефоны, используемые для прослушивания голосовых указаний программного обеспечения;

- методические материалы, в которые входят теоретические сведения по основам ручной дуговой сварки, сведения по технике безопасности при проведении сварочных работ, а также описание не менее 12 тематических за-

ятий, содержащих не менее 80 различных практических заданий [12].

Дуговой тренажер сварщика ДТС-02 (рис. 3) предназначен для тренировки и начального обучения электросварщиков приемам ручной дуговой сварки трех видов: сварки покрытым электродом, полуавтоматической сварки электродной проволокой в среде защитных газов, аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с контактным возбуждением дуги.



Рис. 3. Дуговой тренажёр сварщика ДТС-02

Тренажер обеспечивает приобретение опыта по поддержанию определенной длины дугового промежутка и пространственного положения ручного инструмента по отношению к поверхности объекта сварки.

Тренажер позволяет:

- имитировать процесс сварки с помощью реальной малоамперной сварочной дуги;

- вводить исходные параметры имитируемого сварочного процесса (длина дугового промежутка, угол наклона электрода);

- регистрировать информацию о тренировочном сеансе;

- формировать сигналы акустической обратной связи при нарушении контролируемых параметров граничных значений;

- изменять сложность учебных задач по всем или отдельным параметрам;

- проводить статистическую обработку и оценивать результаты тренировочного сеанса, документально фиксировать результаты тренажа в виде табличной и графической информации на бумажном носителе [13].

Виртуальный тренажер сварщика Lincoln Electric VRTEX 360 (рис. 4) предназначен для получения и закреп-

ления навыков сварки на основе компьютерного симулятора виртуальной реальности. Он дает возможность полностью имитировать окружающую обстановку сварщика и процесс сварки, что существенно сократит затраты на оборудование, материалы, электроэнергию

и снизит загрязнение окружающей среды. Комбинация визуальной воспроизводимой наплавки металла, звука сварочной дуги создает у обучающегося впечатление реальной обстановки на рабочем месте.



Рис. 4. Виртуальный тренажер сварщика Lincoln Electric VRTEX 360

Возможности тренажера заключаются в имитации сварки различных сварочных процессов и типов сварных соединений во всех пространственных положениях [14].

Сравнительный анализ основных характеристик сварочных тренажеров показал, что тренажеры для обучения операторов-сварщиков ручной дуговой сварки позволяют:

- повысить производительность и качество обучения;
- сократить расходы на выявление качественных характеристик свар-

ного шва при помощи разработанного программного обеспечения (по сравнению с оценкой качества на реальном процессе);

- снизить расходы на обучение;
- ускорить время обучения и подготовки специалистов в области сварки согласно международным стандартам (в зависимости от сферы деятельности (нефтепереработка, домостроение, сварка металлоконструкций));
- применить их при переаттестации сварщиков органами технического надзора;

– осуществить рейтинговый контроль при обучении сварщиков.

Согласно анализу современных сварочных тренажеров, используемые в настоящее время системы для обучения имеют следующие недостатки: не задействована информация по поддержанию постоянной длины дуги, невозможно имитировать плавление электрода, не учитываются углы наклона электрода, отсутствует возможность формирования сварного шва, невозможна оценка качества формирования сварного соединения после окончания процесса. Помимо этого, инструктор не может объективно контролировать процесс сварки в реальном времени из-за отсутствия совокупной информации о ходе процесса. Поэтому следует совершенствовать процесс обучения, включая в него современные технологические системы обучения. Автором предлагается с помощью персонального компьютера смоделировать тепловую сварочную ситуацию (зависимость между силой сварочного тока и напряжением), используя программное обеспечение Cosmos Works, основанное на численном анализе метода конечных элементов. С помощью программы можно рассчитать, в каких опасных сечениях сваренных образцов со смещением электрода вероятнее всего на практике могут находиться дефекты, и подтвердить это, применяя наглядные пособия (стенды, сваренные образцы). Необходимо, чтобы опытные сварщики, смещая электрод в различных направлениях, выполняли контрольные образцы. Это позволит косвенно оценить качество провара (его наличие или отсутствие), а при наличии дефекта в сварном шве – выполнять заваривание стандартного дефекта. При обучении навыкам манипулирования сварочной дугой на сварочном тренажере учащиеся будут получать дефект в сварных соединениях, связанный со смещением электрода от оси движения. Это даст возможность оценить на мониторе сварочного тренажера дефект при

таком отклонении, а также сам контрольный образец, выполненный ранее. Основные дефекты, которые могут зависеть только от положения электрода, – это смещение электрода от оси движения, наплыв (неправильно выбран наклон электрода), подрез (смещение электрода в сторону вертикальной стенки), наблюдаемый в угловых и тавровых соединениях, неравномерная форма шва (неточное направление электрода), непровар (несплавление) кромки шва (смещение электрода от оси стыка шва). Для определения качества выполнения сваренных соединений необходимо произвести поперечные разрезы (шлифы), что позволит увидеть внутреннее сечение сварного шва.

По окончании тренировки на сварочном тренажере учащиеся смогут:

- увидеть наглядный пример сваренных образцов с дефектами и выполненных микрошлифов этих дефектов;
- просмотреть тепловую задачу, т. е. температурный режим для выяснения возникновения дефектов;
- проследить методику исправления ошибки.

Заключение

В основе системы обучения сварщиков лежит формирование программных моторных навыков путем проведения множества реальных сварочных процессов в различных пространственных положениях разными способами. Причем качество сварного соединения может быть оценено только после окончания сварки лабораторными испытаниями. Такие способы оценки качества и навыков работы, особенно на начальных стадиях обучения, являются дорогостоящими, требуют больших затрат времени и применения специализированного оборудования.

Предлагаемая методика совместного использования сварочных тренажеров и современных мультимедийных технологий позволит существенно

улучшить систему подготовки специалистов рабочей профессии сварщик за счет применения наглядных пособий и технических средств обучения.

Практическая значимость тренажерных средств – снижение временных

и материальных затрат при практической подготовке сварщиков, применение этих средств при переедтестации сварщиков органами технического надзора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сироткин, Ф. П.** Дидактические условия производственного обучения специалистов сварочного производства : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.08 / Ф. П. Сироткин. – Н. Новгород, 2005. – 149 л.
2. **Ишигов, И. О.** Информационно-измерительная система для испытательного стенда обучения операторов-сварщиков ручной дуговой сварки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / И. О. Ишигов. – Волгоград, 2008. – 18 с.
3. Информационные технологии при подготовке сварщиков и специалистов сварочного производства : современные тенденции / Б. Е. Патон [и др.] // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 10–16.
4. **Мельник, М. В.** Инновационные технологии обучения рабочей профессии в условиях педагогического вуза / М. В. Мельник, О. Ф. Смолякова // Весн. ім. І. П. Шамякіна. – 2013. – № 4 (41). – С. 99–105.
5. **Лукиянов, В. Ф.** Опыт использования дистанционного обучения для профессиональной переподготовки инженеров сварочного производства / В. Ф. Лукиянов // Сварка и диагностика. – 2007. – № 3. – С. 12–14.
6. **Кайтель, С.** Образование и подготовка специалистов в области сварки и испытания материалов / С. Кайтель, К. Арене // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 204–207.
7. **Сидоров, В. П.** Организационно-техническое обеспечение непрерывной практической подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства / В. П. Сидоров, В. И. Столбов // Сварка и диагностика. – 2007. – № 4. – С. 5–7.
8. **Тувана, М. Х.** Разработка тренажерных средств для подготовки к аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / М. Х. Тувана. – Ростов н/Д, 2002. – 148 л.
9. Электронные тренажерные системы в сварке / Б. Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. – 1988. – № 5. – С. 45–48.
10. Тренажер для обучения сварщика ручной дуговой сварке плавящимся и неплавящимся электродом : пат. 2373040 С1 РФ, МПК В 23 К 37/04, В 23 К 9/10, G 09 В 19/24 / Л. М. Лобанов [и др.] ; заявитель и патентообладатель ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. – № 2008108601/02 ; заявл. 04.03.08 ; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32. – 17 с. : ил.
11. Тренажер сварщика Virtual Welding // Объединенная сварочная компания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.welder.by/catalog/149/459.html>. – Дата доступа : 19.06.2013.
12. Малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС-05М // Омега [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cnc-omega.ru/products/svarnoe/116>. – Дата доступа : 22.09.2013.
13. Дуговой тренажер сварщика ДТС-02 // Омега [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.cnc-omega.ru/products/svarnoe/114>. – Дата доступа : 23.10.2013.
14. VRTEX 360 – комплект для обучения сварке в виртуальной среде // DeltaSVAR оборудование для сварки и резки [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.lincoln-welding.ru/publicaczi/stati/vrtex-360-komplekt-dlya-obucheniya-svarke-v-virtualnoj-srede>. – Дата доступа : 23.07.2013.

Статья сдана в редакцию 23 февраля 2015 года

Мария Васильевна Мельник, ассистент, Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина.

Mariya Vasilyevna Melnik, assistant lecturer, Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamiakin.

УДК 621.83.06

И. С. Сазонов, А. П. Прудников, М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА СОСТАВНЫХ РОЛИКОВ В ПЕРЕДАЧАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

UDC 621.83.06

I. S. Sazonov, A. P. Prudnikov, M. Y. Lustenkov, E. S. Fittsova

RESEARCH OF WEAR OF COMPOSITE ROLLERS IN TRANSMISSIONS WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES

Аннотация

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований износа элементов составного ролика в передаче с промежуточными телами качения. Определена зона наибольшего изнашивания в контакте элементов ролика. Разработана математическая модель, позволяющая на базе экспериментальных данных находить величину износа элементов составных роликов и время работы передачи до замены составных роликов вследствие достижения ими предельного износа.

Ключевые слова:

механическая передача, промежуточные тела качения, составной ролик, эксперимент, износ, долговечность.

Abstract

The paper presents the results of theoretical and experimental research, the objective of which is to determine wear of elements of a composite roller in the transmission with intermediate rolling bodies. The area of highest wear in contact with roller elements is defined. The mathematical model has been derived, which, based on the experimental data, determines the amount of wear of elements of composite rollers and the transmission operating time before composite rollers are replaced due to reaching limiting wear.

Key words:

mechanical transmission, intermediate rolling bodies, composite roller, experiment, wear, durability.

Введение и постановка задачи

Одной из главных характеристик качества механической передачи является ее надежность, которая во многом определяется таким свойством механизма, как долговечность. Передачи с промежуточными телами качения (ППТК) разрабатываются сравнительно недавно, и указанное свойство не исследовано в достаточной степени. Важным фактором, влияющим на долговечность ППТК с составными роликами в качестве промежуточных тел, является износ поверхностей элементов качения.

ППТК представляют собой целый класс механизмов и имеют множество разновидностей. В Белорусско-Российском университете исследуются передачи, преимуществом которых являются малые габариты в радиальном направлении [1]. Передача состоит из нескольких коаксиально расположенных цилиндрических или сферических обойм. Наружная и внутренняя обоймы содержат периодические замкнутые беговые дорожки, образованные парами внутренних и наружных торцовых кулачков соответственно. Внутренняя обойма, как правило, является ведущим валом передачи, а

промежуточная (сепаратор) – ведомым. Для обеспечения качения без проскальзывания ролики сконструированы составными. Каждый из трех элементов ролика имеет возможность вращаться относительно других элементов и контактирует с одним из основных звеньев передачи. Составные ролики в процессе передачи нагрузки совершают сложное движение, которое является результатом сложения переносного (совместно с ведомым валом – сепаратором) и относительного движения (вдоль осевых пазов сепаратора) [1, с. 144–147]. Поскольку основные звенья передачи (ведущее и ведомое) вращаются с разными угловыми скоростями, то и элементы качения составных роликов, взаимодействующие с этими звеньями, вращаются с различными скоростями, что ведет к возникновению скольжения между отдельными элементами составных роликов и, соответственно, к их износу. Износ влечет за собой значительное уменьшение величины площадки контакта взаимодействующих элементов составных роликов и в результате увеличение напряжения смятия. При этом в качестве критерия прочности передачи принималась прочность на смятие в отличие от передач с цельными телами качения, где основным критерием будет являться контактная прочность [2].

Цель работы – установление функциональной зависимости износа поверхностей элементов качения составных роликов ППТК от их конструкции, геометрических параметров, кинематических характеристик, действующих сил и свойств контактирующих поверхностей.

Определение скоростей скольжения

Так как конструкция передачи цилиндрического типа предполагает возможность компенсации износа поверхностей беговых дорожек и наружных поверхностей элементов качения путем периодического перемещения кулачков вдоль оси передачи, критерием износо-

стойкости будет являться предельный износ внутренних поверхностей элементов качения и стержня, связанного с одним из элементов [3]. Скорость изнашивания определяется по формуле [4]

$$v_{\text{и}} = k_{\text{и}} \cdot p \cdot v_{\text{ск}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент, характеризующий износостойкость материала и условия работы, Па^{-1} ; p – давление, Па ; $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения, м/с .

Для нахождения скоростей скольжения между элементами составных роликов необходимо определить относительные скорости вращения этих элементов [5]. Существуют три варианта конструкции составного ролика, отличающиеся стержневым элементом, на который устанавливаются остальные элементы (втулки) составного ролика (рис. 1). При этом угловая скорость вращения элемента ролика относительно ведомого вала ω_{42} и угловые скорости вращения ω_{42} и ω_{43} элементов ролика относительно ведущего вала и кулачков, установленных в корпусе соответственно, будут иметь разные направления.

С точки зрения обеспечения максимального КПД [6] наиболее эффективной конструкцией является та, в которой стержень, на котором установлены элементы качения, жестко соединен с элементом составного ролика, взаимодействующим с остановленным звеном – корпусом с наружными кулачками (рис. 1, б).

Отсутствие проскальзывания на линии контакта двух поверхностей обеспечивается при условии равенства линейных скоростей двух тел в точках контакта. Если данное условие не соблюдается, возникает скольжение, которое сопровождается интенсивным износом контактирующих поверхностей.

Определим скорости скольжения на поверхностях элементов составного ролика, взаимодействующих друг с другом, для всех представленных вариантов конструкций составных роликов:

$$\begin{aligned} v_{21\text{ск}} &= v_{41} + v_{42} = \omega_{41} \cdot r_{21} + \omega_{42} \cdot r_{21} = \\ &= r_{21} \cdot (\omega_{41} + \omega_{42}) ; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{31\text{ск}} &= v_{41} - v_{43} = \omega_{41} \cdot r_{31} - \omega_{43} \cdot r_{31} = \\ &= r_{31} \cdot (\omega_{41} - \omega_{43}) ; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_{23\text{ск}} &= v_{43} + v_{42} = \omega_{43} \cdot r_{23} + \omega_{42} \cdot r_{23} = \\ &= r_{23} \cdot (\omega_{43} + \omega_{42}) , \end{aligned} \quad (4)$$

где $v_{21\text{ск}}$ – скорость скольжения в зоне контакта элементов составного ролика, взаимодействующих с ведущим и ведомым валами (рис. 1, а, в), м/с; $v_{31\text{ск}}$ – скорость скольжения в зоне кон-

такта элементов составного ролика, взаимодействующих с ведущим валом и неподвижными наружными торцовыми кулачками (рис. 1, а, б), м/с; $v_{23\text{ск}}$ – скорость скольжения в зоне контакта элементов составного ролика, взаимодействующих с ведомым валом и многопериодными торцовыми кулачками (см. рис. 1, б, в), м/с; v_{41} , v_{42} , v_{43} – линейные скорости перемещения точек поверхностей элементов составного ролика, взаимодействующих с ведущим и ведомым валами и многопериодными торцовыми кулачками соответственно, м/с.

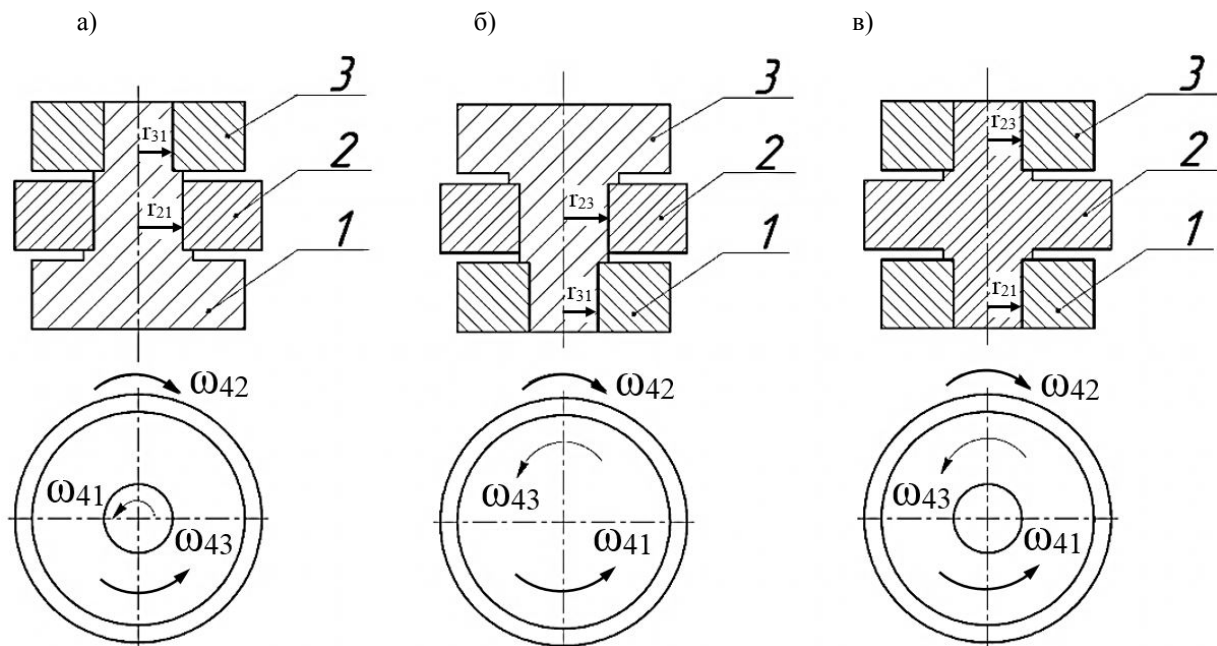


Рис. 1. Варианты конструкции составного ролика: 1 – элемент составного ролика, взаимодействующий с ведущим валом; 2 – элемент составного ролика, взаимодействующий с ведомым валом; 3 – элемент составного ролика, взаимодействующий с заторможенным звеном

Формулы (2)...(4) были получены на базе плоской модели взаимодействия элементов составного ролика с тремя основными звеньями передачи. Из зависимостей (2)...(4), принимая во внимание формулу (1), можно заключить, что наибольшая скорость изнашивания будет наблюдаться в зоне контакта эле-

ментов составного ролика с ведомым валом. Радиусы наружных поверхностей элементов качения не учитывались при анализе, т. к. они оказывают существенно меньшее влияние, нежели относительные угловые скорости, на значения скоростей скольжения.

Расчет величины износа для эле-

ментов составных роликов можно выполнить по аналитическим зависимостям на основе формулы (1), однако полученная величина не учитывает многие факторы (вид смазки, вид материала деталей и твердость его поверхности, характер обработки поверхности деталей и т. д.).

Проведение экспериментальных исследований

Для того чтобы учесть указанные факторы, были проведены эксперименты, в ходе которых на стенде для износоусталостных испытаний [7] был исследован контакт цилиндрического об-

разца (рис. 2) и контактного ролика.

Испытывались цилиндрические образцы двух типов: из стали 45 с твердостью поверхности 40 HRC и из стали 18ХГТ с твердостью поверхности 50 HRC. При этом применялся контактный ролик, изготовленный из аналогичного материала и имеющий такую же твердость поверхности, как и у испытуемого цилиндрического образца. Шероховатость поверхности контактирующих деталей составляла $Ra\ 0,32$. При проведении испытаний в качестве консистентной смазки применялась смесь графита и масла индустриального (И-20А), используемая в ППТК.



Рис. 2. Испытуемый цилиндрический образец

Для обеспечения адекватности результатов экспериментов, проведенных на фрикционной паре, реальному объекту (передаче) при задании исходных параметров учитывалась ППТК со следующими характеристиками: передаточное отношение $i = 5$; диаметр корпуса передачи 80 мм; частота вращения ведущего вала $n_1 = 3000\ \text{мин}^{-1}$. Длина контакта испытуемого цилиндрического образца с контактным роликом, посредством которого на образец передавалась нагрузка, равнялась 5 мм, что соответствует средним значениям длин контактов элементов составных роликов в разрабатываемых ППТК.

Во время испытаний на стенде СИ-03-Мо (рис. 3, а) [7] требуемая скорость скольжения достигалась за счет установки разных скоростей вращения цилиндрического образца 1 и

контактного ролика 2 (рис. 3, б), при этом частота вращения цилиндрического образца задавалась равной $3000\ \text{мин}^{-1}$.

Для каждого типа испытуемого образца проводились два этапа испытаний в зависимости от величины прикладываемой контактной нагрузки: при 150 и 300 Н. В процессе испытания посредством контактного ролика 2 к испытуемому цилиндрическому образцу прикладывалась радиальная нагрузка, величина износа измерялась измерительным устройством 3 (определялась величина сближения осей цилиндрического образца и контактного ролика, т. е. измерялся их суммарный износ J). Результаты обрабатывались с помощью программных средств ЭВМ, подключенного к датчикам стенда. Каждый этап приложения радиальной нагрузки

включал $1,5 \cdot 10^5$ циклов.

следований представлены на рис. 4 и 5.

Результаты экспериментальных ис-



Рис. 3. Стенд для износоусталостных испытаний СИ-03-Мо: а – машина для износоусталостных испытаний; б – рабочая зона проведения испытаний

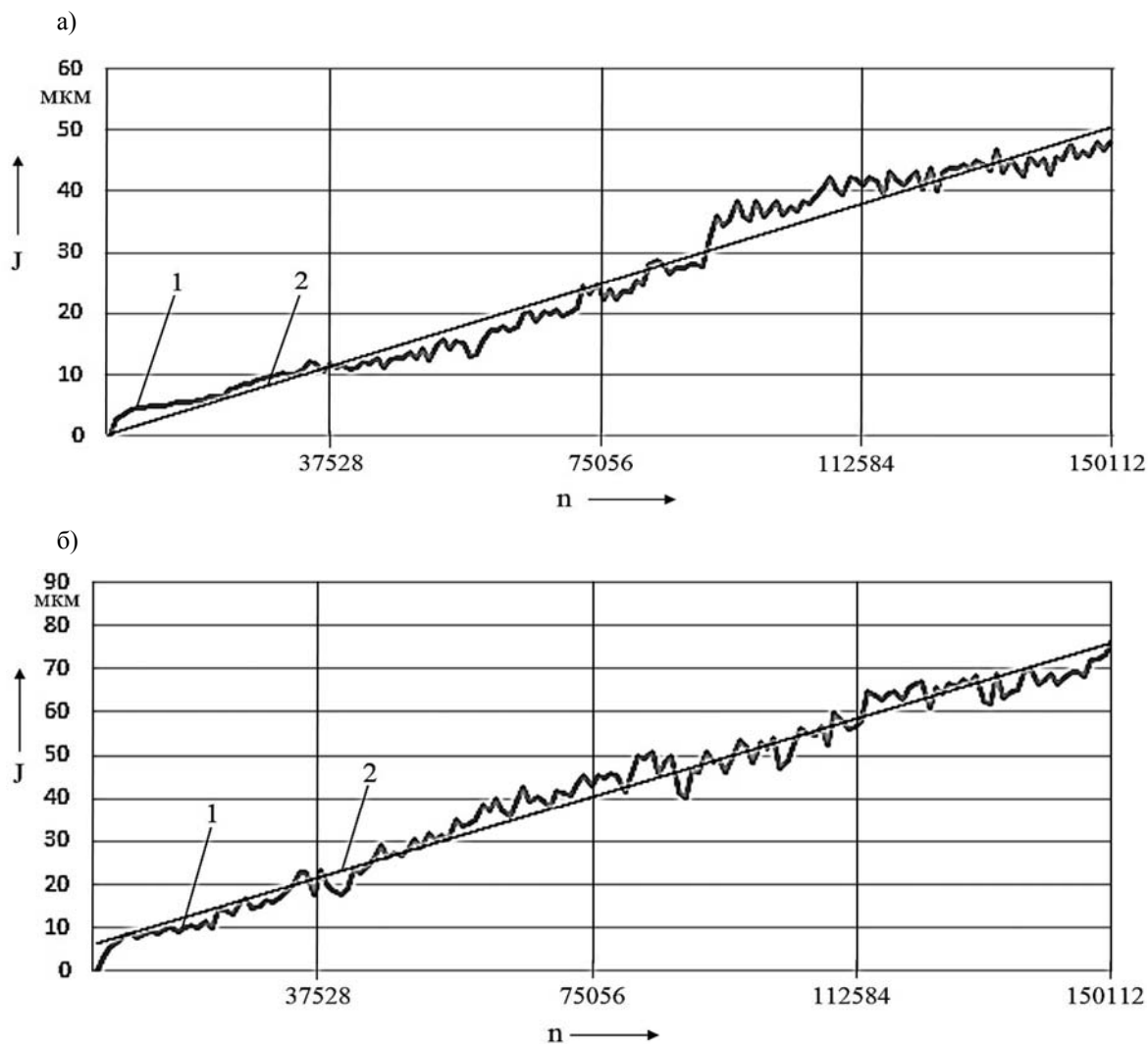


Рис. 4. Зависимость износа от количества циклов испытаний для стали 45: а – при контактной нагрузке 150 Н; б – при контактной нагрузке 300 Н; 1 – опытные данные; 2 – линейная аппроксимация

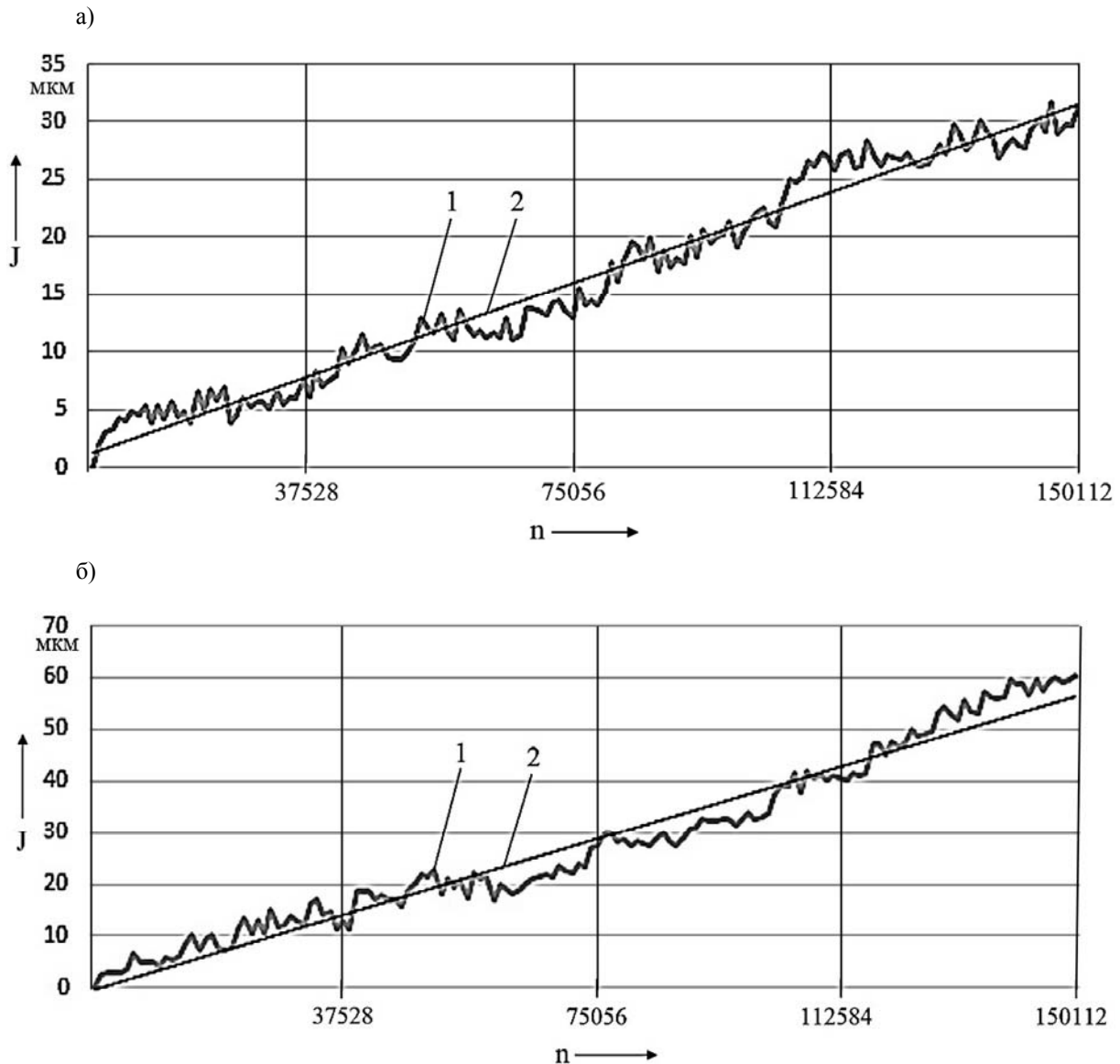


Рис. 5. Зависимость износа от количества циклов испытаний для стали 18ХГТ: а – при контактной нагрузке 150 Н; б – при контактной нагрузке 300 Н; 1 – опытные данные; 2 – линейная аппроксимация

Полученные результаты испытаний показывают, что при увеличении нагрузки от 150 до 300 Н для обоих видов цилиндрических образцов износ возрос в 1,7 раза, а для образцов из стали 45, по сравнению с образцами из стали 18ХГТ, он оказался больше в 1,4 раза [8].

Установлено, что износ носит линейный характер, т. е. его график может быть аппроксимирован прямой линией, как показано на рис. 4 и 5. Соответственно, для рассмотренных видов испытываемых образцов и величин нагрузки

можно определить величину износа с учетом заданного числа циклов. С этой целью представим полученные линейные зависимости в виде линейных уравнений:

– сталь 45, нагрузка 150 Н:

$$n - 3073,2 \cdot J = -2879,6, \quad (5)$$

где J – величина износа, определенная при испытании, мкм; n – число циклов;

– сталь 45, нагрузка 300 Н:

$$n - 2181,6 \cdot J = -14559,2; \quad (6)$$

– сталь 18ХГТ, нагрузка 150 Н:
 $n - 5043,4 \cdot J = -7160,7 ; \quad (7)$

– сталь 18ХГТ, нагрузка 300 Н:
 $n - 2640,2 \cdot J = 182,3 . \quad (8)$

Если допустить, что давление в зоне контакта постоянно, а материал, термообработка и шероховатость поверхностей элементов составных роликов одинаковы, то можно заключить, что величина износа будет пропорциональна скорости скольжения. Аналогичное допущение можно сделать и для сил, действующих на элемент составного ролика, близких по значению к заданным при испытаниях.

Определение величины износа

На базе полученных экспериментальных данных и математических зависимостей и с учетом того, во сколько раз отличаются от результатов испытания давление в зоне контакта и скорость скольжения для рассматриваемого случая, принимая во внимание приведенные материалы элементов составных роликов, можно определить величину их износа для ППТК с различными параметрами. С этой целью рассчитывается число циклов для исследуемой ППТК, эквивалентное заданному при испытаниях:

$$n = \frac{30 \cdot \omega_{42} \cdot t}{\pi}, \quad (9)$$

где t – время работы передачи, мин.

Из полученных уравнений (5)...(8) в зависимости от материала составных роликов и действующей нагрузки определяется величина износа J , которая затем пересчитывается для рассматриваемой ППТК по формуле

$$J_p = J \cdot k_v \cdot k_p, \quad (10)$$

где k_v – коэффициент преобразования скорости скольжения; k_p – коэффициент преобразования давления.

Коэффициент преобразования скорости скольжения

$$k_v = \frac{v_{скР}}{v_{скИ}}, \quad (11)$$

где $v_{скР}$ – скорость скольжения для рассматриваемого случая, м/с; $v_{скИ}$ – скорость скольжения, заданная при испытании, м/с.

Коэффициент преобразования давления

$$k_p = \frac{N_p}{N_{И}} \cdot \frac{l_{И}}{l_p}, \quad (12)$$

где N_p – сила в зоне контакта элементов составных роликов для рассматриваемого случая, Н; $N_{И}$ – сила в зоне контакта, заданная при испытании, Н; $l_{И}$ – длина дуги контакта элементов составного ролика при испытании, м; l_p – длина дуги контакта элементов составного ролика для рассматриваемого случая, м.

Длина дуги контакта элементов составного ролика

$$l_k = r_{21} \cdot \gamma, \quad (13)$$

где γ – угол контакта двух элементов ролика, рад.

Износ приводит к увеличению напряжения смятия в зоне контакта элемента составного ролика, взаимодействующего с ведомым валом. При превышении величиной напряжения смятия допустимого значения вследствие износа составные ролики необходимо заменить.

Формула для расчета напряжений смятия приведена в [9, с. 38]. При этом эпюру действительного распределения напряжений заменяют условной (рис. 6).

Сила, действующая на элемент составного ролика, контактирующий с ведомым валом, определяется по формуле

$$N_2 = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \sigma_{см} \cdot \delta_{42} \cdot r_{21} \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi, \quad (14)$$

где $\sigma_{см}$ – напряжение смятия, МПа;
 δ_{42} – высота элемента составного ролика,

контактирующего с ведомым валом, м.

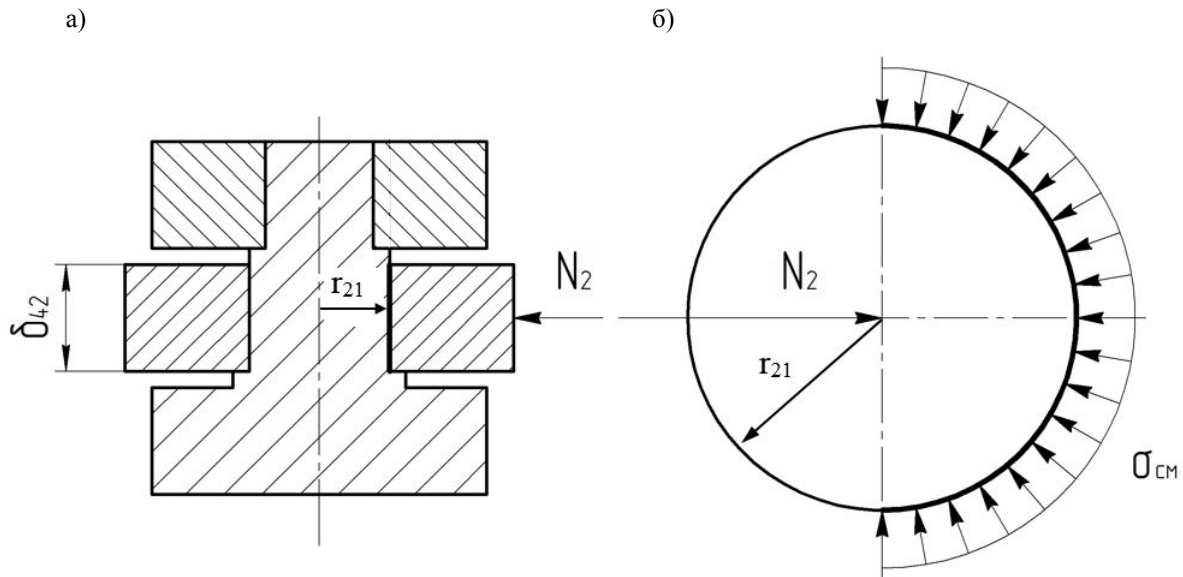


Рис. 6. Схема напряжений смятия, действующих на элемент составного ролика: а – схема взаимодействия элементов ролика; б – схема нагружения стержневого элемента

В результате износа диаметр наружной цилиндрической поверхности элемента 1, контактирующего с элементом 2 (см. рис. 1, а), увеличится на величину износа $J/2$, а внутренний диаметр цилиндрической поверхности элемента 2 (см. рис. 1, а) уменьшится на величину износа $J/2$. Соответственно уменьшится ширина площадки контакта этих элементов составного ролика и увеличатся напряжения смятия. Величина допускаемого напряжения смятия определяется в согласно с [9, с. 53, табл. 1.2].

Угол дуги контакта элементов составного ролика, соответствующий допускаемому напряжению смятия, можно найти на основе зависимости (14) по формуле

$$\gamma = 2 \cdot \beta = 2 \cdot a \sin \left(\frac{N_2}{1,6 \cdot \sigma_T \cdot \delta_{42} \cdot \left(r_{21} - \frac{J}{2} \right)} \right), \quad (15)$$

где σ_T – предел текучести стали, МПа.

Угол дуги контакта одного элемента составного ролика с другим можно определить из геометрических параметров составного ролика (рис. 7):

$$\beta = a \sin \left(\frac{\sqrt{\left(r_{21} - \frac{J}{2} \right)^2 - y^2}}{r_{21} + \frac{J}{2}} \right); \quad (16)$$

$$\left(\left(r_{21} - \frac{J}{2} \right) \cdot k_n \right)^2 - y^2 = \left(r_{21} + \frac{J}{2} \right)^2 - (y + J)^2, \quad (17)$$

где k_n – поправочный коэффициент.

Из системы уравнений, в которую входят выражения (15)...(17), можно найти допускаемую величину износа, при достижении которой необходимо заменить составные ролики:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{N_2}{1,6 \cdot \sigma_T \cdot \delta_{42} \cdot \left(r_{21} - \frac{J}{2}\right)} &= \\ &= \frac{\sqrt{\left(r_{21} - \frac{J}{2}\right)^2 - y^2}}{r_{21} + \frac{J}{2}}; \quad (18) \\ \left(\left(r_{21} - \frac{J}{2}\right) \cdot k_n\right)^2 - y^2 &= \\ &= \left(r_{21} + \frac{J}{2}\right)^2 - (y+J)^2. \end{aligned} \right.$$

Определив допустимую величину износа, можно на базе полученных экспериментальных данных и математических зависимостей (9) и (10) рассчитать время работы ППТК до замены составных роликов при известной передаваемой нагрузке, материалах для изготовления деталей передач и физико-механических характеристиках контактирующих поверхностей.

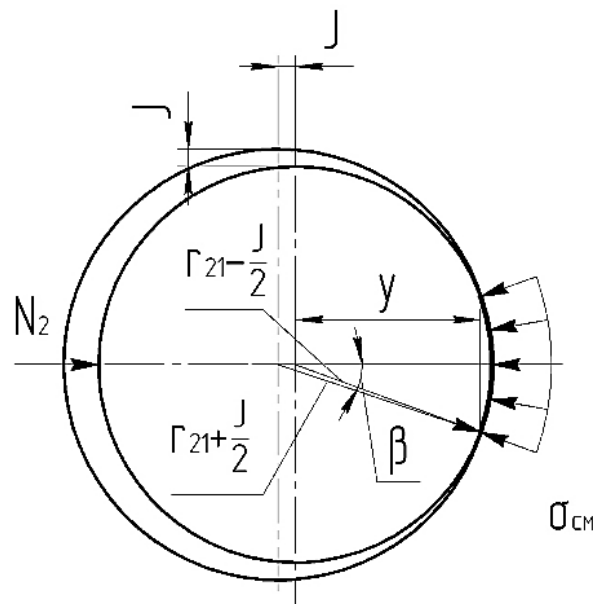


Рис. 7. Схема для определения угла дуги контакта элементов составного ролика

Выводы

Разработана математическая модель, которая позволяет на базе полученных аналитических зависимостей и результатов проведенных испытаний определять величину износа элементов составных роликов и время работы ППТК до их замены. На основе экспериментальных исследований установлен линейный характер износа поверхно-

стей роликов. Показано, что проверку прочности элементов составного ролика на смятие необходимо производить в зоне контакта элемента качения, взаимодействующего с ведомым валом (сепаратором). По результатам проверки принимается решение о необходимости замены элементов составных роликов вследствие достижения предельного износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности : монография / М. Е. Лустенков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
2. **Лустенков, М. Е.** Планетарные шариковые передачи : особенности прочностных расчетов / М. Е. Лустенков // Вестн. машиностроения. – 2010. – № 9. – С. 13–17.
3. **Лустенков, М. Е.** Оценка ресурса и нагрузочной способности передач с составными промежуточными элементами / М. Е. Лустенков, И. С. Сазонов // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Минск : ГНУ ОИМ НАН Беларуси. – Вып. 3. – С. 189–191.
4. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с. : ил.
5. **Прудников, А. П.** Кинематический анализ планетарных передач с составными роликовыми сателлитами / А. П. Прудников, М. Е. Лустенков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4(29). – С. 90–97.
6. **Лустенков, М. Е.** Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 13–19.
7. **Сосновский, Л. А.** Введение в трибофатику / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. – Минск : БГУ, 2010. – 77 с.
8. **Прудников, А. П.** Экспериментальное определение износа составных роликов передачи с промежуточными телами качения / А. П. Прудников // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 50.
9. **Иванов, М. Н.** Детали машин: учебник для машиностроит. специальностей вузов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 12-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 2008. – 408 с.

Статья сдана в редакцию 2 марта 2015 года

Игорь Сергеевич Сазонов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-26-61-00.

Александр Петрович Прудников, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-26-40-14.

Михаил Евгеньевич Лустенков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-71.

Екатерина Сергеевна Фитцова, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-10-91.

Igor Sergeyevich Sazonov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-26-61-00.

Aleksandr Petrovich Prudnikov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-26-40-14.

Mikhail Yevgenyevich Lustenkov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-36-71.

Ekaterina Sergeyevna Fittsova, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-10-91.

УДК 629.3

В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, Р. В. Плякин, В. С. Савицкий

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

UDC 629.3

V. P. Tarasik, N. N. Gorbatenko, R. V. Pliakin, V. S. Savitsky

MECHATRONIC SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF MOBILE MACHINES HYDROMECHANICAL TRANSMISSION

Аннотация

Приведено описание созданной мехатронной системы автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ. Изложены назначение, функциональные свойства и конструктивные особенности ее компонентов. Приведена принципиальная схема разработанной экспериментальной установки для исследования процессов функционирования системы.

Ключевые слова:

гидромеханическая передача, мехатронная система автоматического управления, микропроцессорный контроллер, селектор режимов управления, карьерный самосвал.

Abstract

The mechatronic system developed for automatic control of hydromechanical transmission of BelAZ quarry dump trucks is described. The purpose, functional properties and design features of the system components are given. The basic diagram of the experimental setup developed for studying the system operation is presented.

Key words:

hydromechanical transmission, mechatronic system of automatic control, microprocessor controller, control mode selector, quarry dump truck.

Коллектив кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета в течение 40 лет активно участвует в проведении научных исследований и конструкторских разработок гидромеханических передач (ГМП) мобильных машин различных назначений и систем автоматического управления этими передачами. Для реализации выполняемых разработок в 1984 г. решением Минтракторсельхозмаша СССР в ММИ была создана отраслевая НИЛ «Системы управления тягово-транспортными машинами», которая действовала до 1993 г., что позволило осуществить ряд проектов.

Совместно с конструкторами

РУП «БелАЗ» создано и внедрено в производство семейство унифицированных ГМП для карьерных самосвалов и строительно-дорожных машин БелАЗ и МоАЗ с двигателями мощностью 200...600 кВт. Для боевой машины десанта БМД-950 «Бахча», выпускаемой на Волгоградском тракторном заводе, разработана система управления переключением передач.

В период 1995...2003 гг. выполнен комплекс научных исследований и разработок по созданию мехатронных систем автоматического управления (МСАУ), ориентированных на использование электроники. Разработаны ме-

тодика синтеза адаптивных электронных систем управления ГМП и алгоритмы управления [1, 3, 4, 9]. На их основе в 2003 г. создана первая опытная МСАУ для военной гусеничной машины ГМ-352М1Е, выпускавшейся на МТЗ, а в 2004...2005 гг. – для карьерного самосвала БелАЗ-7516 г/п 130 т. Однако серийное производство этих машин не состоялось.

Учитывая положительные результаты испытаний опытных образцов МСАУ, с 2008 г. начался новый этап их разработки и освоения. Разработка осуществлялась для самосвала БелАЗ-7555 г/п 60 т. Структура МСАУ была скомплектована на базе импортных компонентов, в основном фирмы «Рексрот Бош Груп». Машина успешно прошла этап заводских испытаний и была отправлена для работы в карьере «Гранит» (г. Микашевичи, Брестская обл.), где прошла около 100 тыс. км.

Положительная оценка результатов испытаний позволила сформировать и утвердить в 2010 г. в ГНТК задание А-06.22 «Разработать и освоить производство мехатронной системы управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ» ГНТП «Машиностроение». В итоге к концу 2013 г. был получен полный комплекс компонентов МСАУ. В его создании принимали участие коллективы трёх организаций: кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета; лаборатории электрогидравлических систем управления Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и предприятия ОАО «Измеритель». Техническое задание на компоненты разработал научный руководитель коллектива Белорусско-Российского университета.

Созданная МСАУ имеет распределенную структуру, состоит из множества компонентов, располагаемых в различных местах самосвала [2, 5, 6].

На рис. 1 представлена структурная схема МСАУ. В её состав входят

следующие компоненты: микропроцессорный контроллер; селектор режимов управления ГМП; блок аварийного управления БАУ (размещен в корпусе селектора); электронная педаль акселератора; панель индикации; электрогидравлические пропорциональные клапаны ЭГПК управления фрикционами ГМП; электрогидравлический клапан управления тормозом-замедлителем ЭГК_ТЗ; датчики частоты вращения валов ГМП (ДЧ1 – вала турбины; ДЧ2 – промежуточного вала; ДЧ3 – выходного вала); датчики давления (Д_ГЛ – главного давления; Д_ГТ – давления гидротрансформатора; Д_СМ – давления смазки); реле давления в каналах подачи масла в гидроцилиндры фрикционов РД; датчик температуры масла ГМП Д_ТМ; переключатель режимов управления ПРУ; датчик стояночного тормоза Д_СТ; датчик рабочего тормоза Д_РТ; датчик положения грузовой платформы самосвала Д_ПГП; датчик включения тормоза-замедлителя Д_ТЗ; датчик засоренности фильтра тонкой очистки масла ГМП Д_ЗФ; система контроля загрузки самосвала СКЗ.

Для отображения принадлежности компонентов ЭГПК и РД соответствующему фрикциону ГМП использованы следующие обозначения: Ф1, Ф2, Ф3 – фрикционы первой, второй и третьей передач соответственно; Фпн, Фпв – фрикционы понижающего и повышающего диапазонов; ФР – фрикцион передачи заднего хода (реверса); Фбл – фрикцион блокировки гидротрансформатора.

Питание всех компонентов МСАУ осуществляется от бортовой сети самосвала через замок зажигания.

МСАУ обеспечивает три режима управления ГМП: автоматический, командный и аварийный. В автоматическом режиме производится автоматическое переключение передач и автоматическое управление блокированием гидротрансформатора. В командном режиме передачи переключает водитель

вручную посредством перемещения рычага селектора, а управление блокированием гидротрансформатора автоматическое. Аварийный режим управления используется при необходимости доставки самосвала с неисправной МСАУ

или ГМП на базу ремонта. На этом режиме можно включить первую передачу и передачу реверса. Включение аварийного режима осуществляется переключателем режимов управления ПРУ (см. рис. 1).

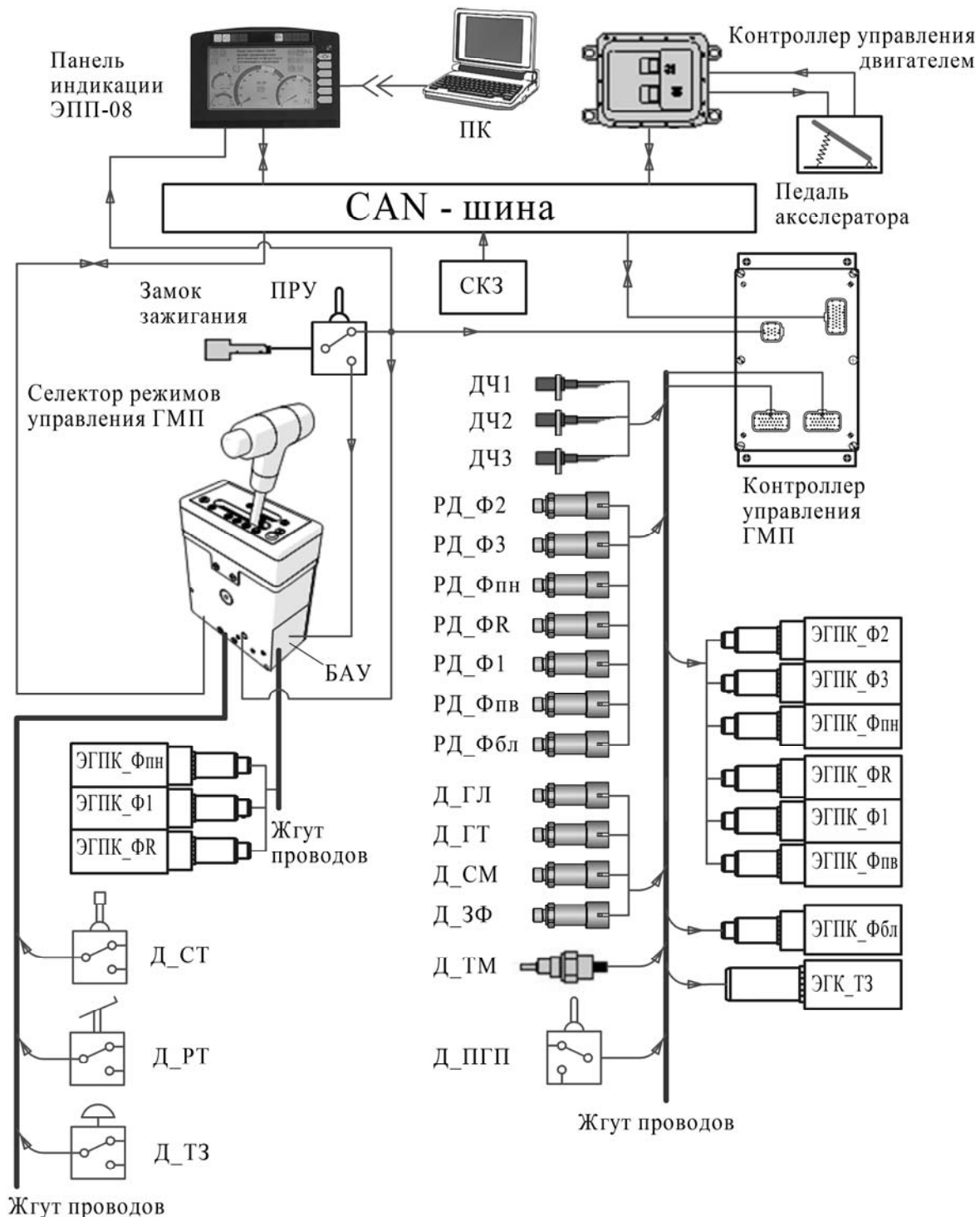


Рис. 1. Структурная схема МСАУ ГМП

В штатном режиме питание от замка зажигания поступает через переключатель ПРУ к селектору режимов управления, контроллеру и панели индикации, обеспечивая их функционирование в автоматическом и командном режимах управления. При использовании аварийного управления питание компонентов МСАУ отключается переключателем ПРУ, а силовые выходы контроллера при этом отключаются от электромагнитов ЭГПК.

Аварийное управление обеспечивается специальным блоком БАУ, размещенным в корпусе селектора режимов управления, в котором расположены силовые выходы этого блока. При переводе переключателя ПРУ в положение аварийного управления запрашивается электромагнит ЭГПК_Фпн, что влечет за собой включение фрикциона понижающего диапазона. Включение первой передачи или передачи реверса в режиме аварийного управления осуществляется рычагом селектора, посредством которого выдается команда на включение питания электромагнита ЭГПК_Ф1 первой передачи или электромагнита ЭГПК_ФР передачи реверса. Линии передачи сигналов при использовании режима аварийного управления показаны на рис. 1.

В штатном режиме питание от замка зажигания поступает через переключатель ПРУ к селектору режимов управления, контроллеру и панели индикации, обеспечивая их функционирование в автоматическом и командном режимах управления. При использовании аварийного управления питание компонентов МСАУ отключается переключателем ПРУ, а силовые выходы контроллера при этом отключаются от электромагнитов ЭГПК.

Аварийное управление обеспечивается специальным блоком БАУ, размещенным в корпусе селектора режимов управления, в котором расположены силовые выходы этого блока. При переводе переключателя ПРУ в поло-

жение аварийного управления запрашивается электромагнит ЭГПК_Фпн, что обеспечивает включение фрикциона понижающего диапазона. Включение первой передачи или передачи реверса в режиме аварийного управления осуществляется рычагом селектора, посредством которого выдается команда на включение питания электромагнита ЭГПК_Ф1 первой передачи или электромагнита ЭГПК_ФР передачи реверса. Линии передачи сигналов при использовании режима аварийного управления показаны на рис. 1.

Контроллер выполняет следующие функции: сбор информации об управляющих воздействиях на органы управления двигателем, гидромеханической передачей, тормозными механизмами, рабочим оборудованием; сбор информации о текущих значениях параметров реальных режимов работы двигателя, механизмов ГМП, загрузки автомобиля и параметров режима его движения; обработка информации в режиме реального времени; выполнение программы реализации алгоритмов управления; формирование управляющих команд на осуществление переключения передач и блокирование гидротрансформатора; формирование команды на управление режимом двигателя в процессе переключения передач; формирование управляющих команд на осуществление процесса управления давлением в гидравлических цилиндрах включаемых и выключаемых фрикционов при переключении передач; формирование команды на управление гидродинамическим тормозом-замедлителем; осуществление оперативного диагностирования технического состояния электронных компонентов и электрогидравлических исполнительных механизмов системы управления гидромеханической передачей и выявление их неисправностей; выявление ошибочных действий водителя по управлению ГМП и двигателем, парирование этих действий; формирование информации о неисправностях,

организация ее хранения в энергонезависимой памяти контроллера, обеспечение передачи информации на панель индикации и на ноутбук по запросу.

Контроллер в режиме реального времени взаимодействует со всеми электронными компонентами механической системы автоматического управления ГМП самосвала. Связь с селектором режимов управления, подсистемой управления двигателем, системой контроля загрузки (СКЗ) самосвала и панелью индикации осуществляется по CAN-шине. Обмен информацией между ними и передача сигналов управления обеспечиваются посредством интерфейса CAN 2.0 В. Формат CAN-сообщений соответствует стандарту J1939.

Передача управляющих сигналов на электрогидравлические пропорциональные клапаны ЭГПК управления фрикционными гидромеханической передачи осуществляется непосредственно от широтно-импульсных модуляторов (ШИМ) контроллера. Конструкция и принцип действия ЭГПК подробно описаны в [2, 5–7, 10]. Внешний вид ЭГПК представлен на рис. 5, а. Управление гидродинамическим тормозом-замедлителем происходит с помощью электромагнита дискретного типа.

В автоматическом режиме управления ГМП контроллер осуществляет формирование управляющих команд на переключение передач и блокирование гидротрансформатора и обеспечивает выполнение программы алгоритма управления фрикционными в процессе их включения и выключения.

Управляющие команды на переключение передач формируются на базе информации об изменении параметров процесса движения самосвала (скорости, ускорения) с учетом управляющих воздействий водителя на органы управления (педаль акселератора, педаль рабочего тормоза, состояние стояночного тормоза, положение грузовой платформы), а также загрузки самосвала и дорожных условий. Основой алгоритма

этих команд являются базисные характеристики автоматического переключения передач.

Предусмотрены два вида характеристик автоматического переключения передач, позволяющие получить динамичный или экономичный режимы движения самосвала [1]. Динамичному режиму свойственно эффективное использование мощности двигателя и возможность достижения высокого значения средней скорости движения, а следовательно, и производительности самосвала. Экономичный режим позволяет снизить расход топлива, но при этом получается несколько меньшее значение средней скорости.

На рис. 2 приведены характеристики автоматического переключения передач самосвала БелАЗ-7555Е. Сплошными линиями изображены характеристики пороговых значений скорости v , при достижении которых производится переключение с низших на высшие передачи, а штриховыми – характеристики пороговых значений скорости при переключениях с высших на низшие передачи. Характеристики переключений зависят от положения педали акселератора γ_a , %. При $\gamma_a < 65$ % приняты постоянные пороговые значения скоростей, поэтому фактически переключение передач в этом случае не происходит.

После каждого переключения передачи в автоматическом режиме контроллер устанавливает задержку возможности формирования следующего переключения на время 2...3 с. В качестве источника информации об изменении скорости самосвала используется датчик частоты вращения выходного вала ГМП $n_{в.в.}$.

Если включен стояночный тормоз или не опущена грузовая платформа, формирование команд на переключение передач не осуществляется.

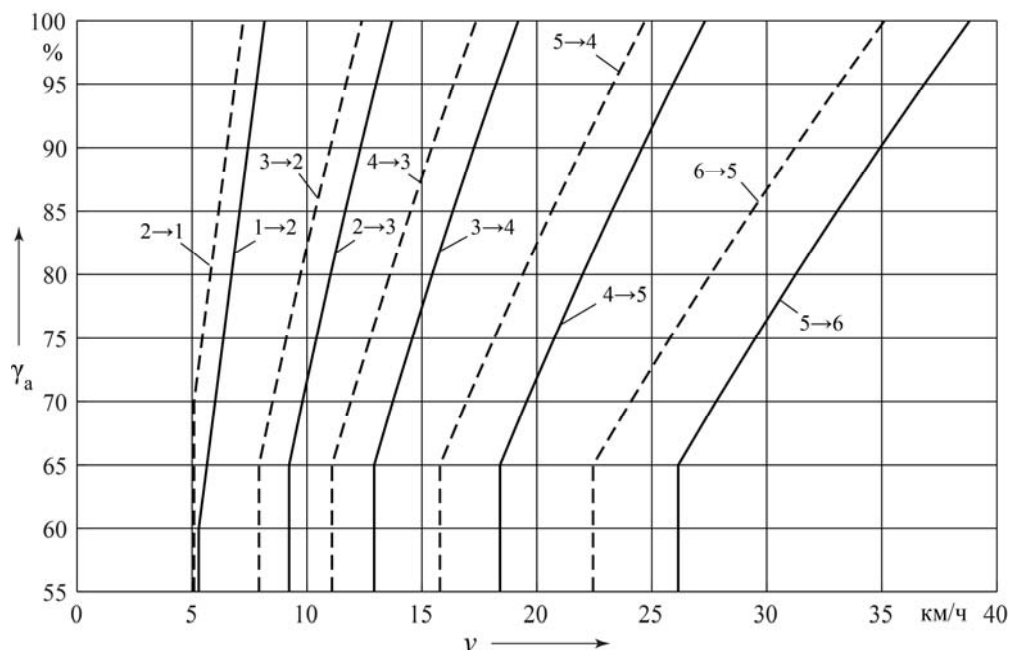


Рис. 2. Характеристики автоматического переключения передач

При торможении движущегося самосвала рабочим тормозом переключение передач не производится, а после прекращения торможения включается передача, соответствующая действительной скорости. Первая передача и передача реверса включаются только при условии, если частота вращения вала двигателя не превышает 800 об/мин, а частота вращения выходного вала ГМП не более 50 об/мин.

На командном режиме управления переключение на высшую передачу возможно при любой скорости самосвала, а на низшую — лишь при снижении скорости до заданных предельных значений.

Блокировка гидротрансформатора выполняется автоматически на всех передачах в автоматическом и командном режимах управления. На первой передаче и передаче заднего хода гидротрансформатор не блокируется. Он также не блокируется в положении **N** рычага селектора (нейтраль в коробке передач) и при поднятой грузовой платформе. При снижении частоты враще-

ния вала турбины ниже 1200 об/мин гидротрансформатор разблокируется. Разблокировка гидротрансформатора происходит также при включении рабочего или стояночного тормоза.

Контроллер управления ГМП содержит мощный 16-битный микропроцессор и средства управления специальными устройствами. В качестве среды программирования используется операционная система CoDeSys v.2.3 от 3S—Smart Software Solutions международного стандарта IEC 61131-3. Функциональная схема контроллера приведена на рис. 3, а на рис. 4, а показан его общий вид.

Контроллер имеет аналоговые, резистивные и частотные входы, дискретные выходы и выходы сигналов управления фрикционами ГМП, формируемых контроллером по соответствующим алгоритмам посредством ШИМов. Входы защищены от перенапряжений и электрических наводок. Дискретные выходы предназначены для прямого управления электромеханическими реле, лампами и выключателями.

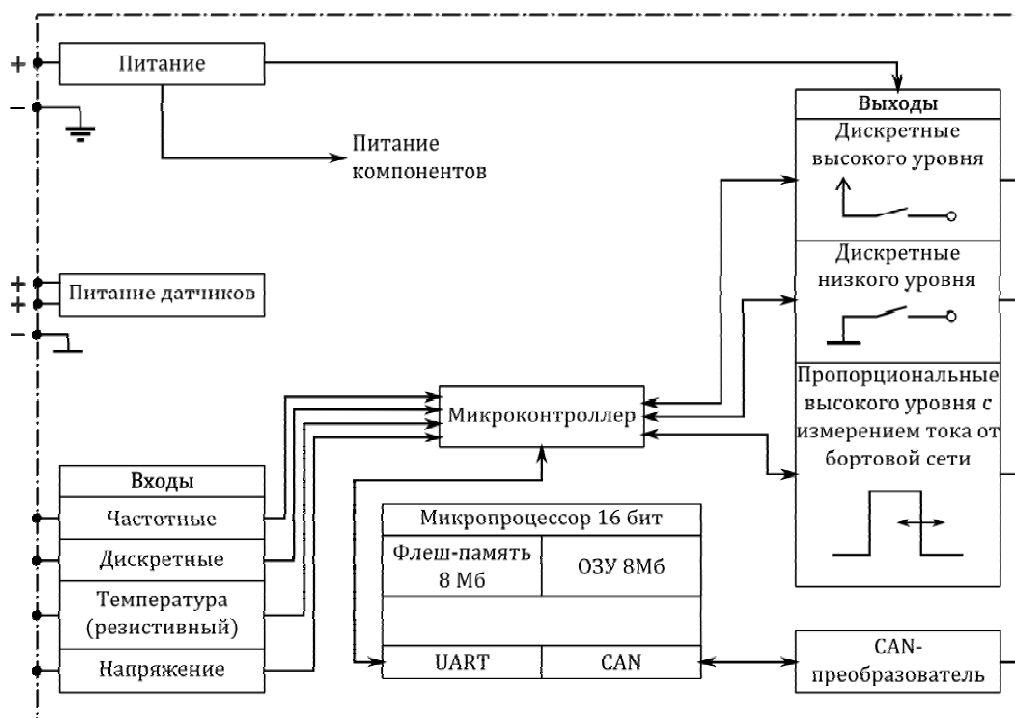


Рис. 3. Функциональная схема контроллера

а)



б)



Рис. 4. Внешний вид контроллера (а) и селектора режимов управления ГМП (б)

На выходах ШИМов формируются токовые сигналы управления пропорциональными электромагнитами, обеспечивающие

плавное получение заданных характеристик изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах фрикционных

ГМП в процессе их включения и выключения. В контроллере использовано восемь ШИМов. Все ШИМы снабжены обратными связями по току, что позволяет компенсировать изменение сопротивления обмоток электромагнитов при их нагреве и гарантировать соответствие характеристик заданного алгоритма управления с реализуемыми характеристиками включения фрикционов.

Селектор режимов управления ГМП [8, 11] представляет собой электромеханическое устройство и предназначен для выполнения следующих функций: выбор и задание водителем режимов управления переключением передач ГМП; сбор и обработка информации о воздействиях водителя на рычаг селектора; формирование информационных сигналов о выбранных режимах управления и передача их по CAN-каналу в контроллер ГМП и в панель индикации; осуществление аварийного управления в случае выхода из строя контроллера, электронного блока селектора или CAN-шины.

Внешний вид селектора представлен на рис. 4, б. Селектор обеспечивает формирование сигналов управления для осуществления следующих режимов управления ГМП:

- «**P**» – состояние парковки автомобиля (Parking);
- «**N**» – нейтральное состояние ГМП (Neutral);
- «**D**» – режим автоматического управления переключением передач (Drive);
- «**R**» – режим движения назад (Reverse – реверсирование);
- «**L**» – режим запрета включения высших передач при автоматическом управлении ГМП (Low);
- «**C**» – режим командного управления переключением передач (Command);
- «+» – повышение номера передачи в командном режиме;
- «–» – понижение номера передачи в командном режиме.

Механизмы селектора смонтированы в закрытом корпусе. Выбор режимов управления ГМП производится посредством рычага селектора, который может перемещаться в двух продольных плоскостях и в одной поперечной плоскости относительно соответствующих пазов (дорожек), выполненных на лицевой панели селектора. При движении рычага в левой длинной продольной дорожке спереди назад он последовательно перемещается в фиксированные положения $P \rightarrow R \rightarrow N \rightarrow D \rightarrow L$.

Для использования командного режима управления переключением передач рычаг селектора переводится в положение **C**, находящееся в правой короткой дорожке. Этот переход возможен только из положения **D** автоматического режима управления путем поворота рычага в поперечной плоскости и перемещения его вдоль поперечной дорожки вправо.

Во всех позициях рычага селектора, кроме позиций «+» и «–», происходит фиксация его состояния. Для этого использованы два пружинных фиксатора и два механизма жесткого стопорения (блокировки) рычага. Один из механизмов жесткого стопорения управляется электромагнитом, а второй – кнопкой, расположенной на рукоятке рычага селектора.

Жесткое стопорение рычага селектора электромагнитным механизмом осуществляется в положениях **P** и **N**. Блокирование рычага в этих положениях предотвращает случайные непреднамеренные его перемещения в другие положения, что исключает вероятность самопроизвольного трогания автомобиля с места и обеспечивает безопасность управления. Во всех остальных положениях рычага электромагнитный механизм стопорения находится в выключенном состоянии. Возможность перемещения рычага в дорожках лицевой панели селектора контролируется пружинными фиксаторами, а в положениях **P**, **R** и **L** – дополнительно пружинным

механизмом стопорения, управляемым кнопкой рычага селектора.

Для получения информации о положениях рычага селектора использованы бесконтактные датчики Холла, а информация о выбираемых водителем режимах высвечивается светодиодными индикаторами в окошках, расположенных на лицевой панели селектора напротив соответствующих положений его рычага (см. рис. 4, б). Окошки индикации положений **P, R, N, D, L** находятся слева от длинной продольной дорожки, а окошки индикации режимов «+» и «-» расположены вдоль оси короткой продольной дорожки. Положение **C** не имеет индикатора. Индикация обозначений режимов осуществляется зеленым цветом.

В передней части лицевой панели селектора находится индикатор электромагнитной блокировки рычага, который горит красным цветом в положениях **P** и **N**. В задней части расположена двухпозиционная кнопка выбора экономичного или динамичного режимов автоматического управления переключением передач. Ее подсветка осуществляется на динамичном режиме. Информационный сигнал о выбранном режиме передается по CAN-шине в контроллер, где происходит изменение параметров алгоритма управления.

Сигналы датчиков Холла о выбранном водителем режиме управления ГМП поступают в электронный блок селектора. В этот же блок направляются дискретные сигналы датчиков о положении других органов управления самосвалом: рабочим тормозом, стояночным тормозом, тормозом-замедлителем. Все эти сигналы в электронном блоке селектора подвергаются кодировке и преобразованиям в числовую форму и передаются по CAN-шине в контроллер управления ГМП и в панель индикации.

Для реализации функции аварийного управления селектор располагает автономными силовыми выходами, которые могут быть напрямую связаны с

электромагнитами управления фрикционами, обеспечивающими включение первой передачи и передачи заднего хода. Возникновение аварийного состояния системы автоматического управления ГМП отображается на панели индикации и сопровождается звуковым сигналом. Включение аварийного режима осуществляется переключателем ПРУ (см. рис. 1), имеющим два фиксированных положения – «нормальный» и «аварийный» режимы работы. Этот переключатель расположен отдельно в малодоступном месте кабины.

Взаимодействие селектора режимов управления ГМП с другими компонентами МСАУ осуществляется посредством электрических связей.

Электронная педаль акселератора предназначена для формирования информационного сигнала о задаваемом водителем скоростном режиме дизельного двигателя.

Внешний вид педали акселератора представлен на рис. 5, б.

Информационный сигнал формируется посредством двух бесконтактных аналоговых датчиков угла поворота и бесконтактного дискретного переключателя холостого хода, совокупность которых представляет собой датчик положения педали акселератора ДП. Применение двух датчиков положения педали акселератора позволяет обеспечивать постоянный контроль достоверности получаемой информации о задаваемом водителем скоростном режиме двигателя путем сравнения их выходных сигналов.

Питание обоих датчиков угла поворота осуществляется от источников стабилизированного напряжения постоянного тока контроллера управления двигателем. Один из датчиков запитывается напряжением 5 В, а второй – 8 В.

На рис. 6 показаны характеристики выходных сигналов обоих датчиков. Выходные сигналы этих датчиков передаются в контроллер управления двигателем, где подвергаются цифровому ко-

дированию и в цифровом виде поступают в CAN-шину, из которой информация о положении педали акселерато-

ра получает контроллер управления ГМП.

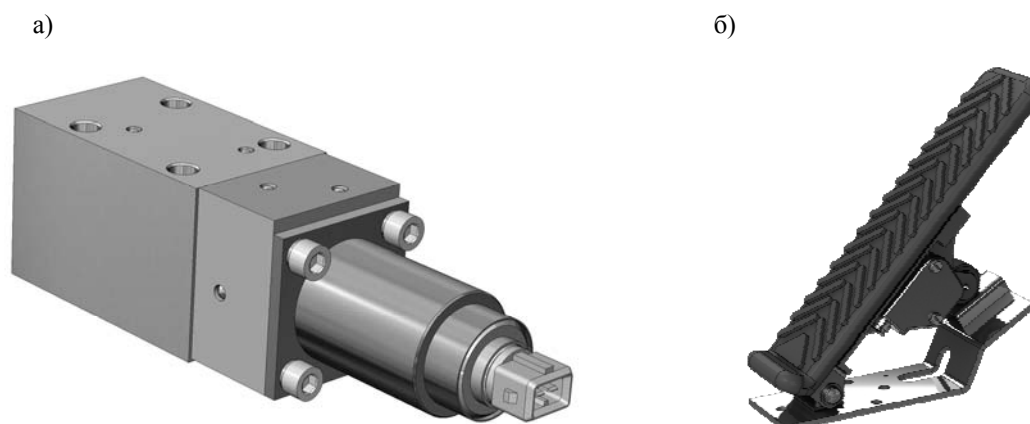


Рис. 5. Внешний вид ЭПК (а) и педали акселератора ПЭ-45-05 (б)

В контроллер двигателя также направляется дискретный сигнал датчика переключателя холостого хода, включение которого происходит при повороте педали акселератора на угол свыше 1,5 град от исходного состояния. Максимальный угол поворота педали аксе-

лератора составляет 18 град. Пределы изменения выходных напряжений датчиков указаны на рис. 6.

Созданные предприятием ОАО «Измеритель» датчик частоты вращения валов ДЧИ-10 и датчик температуры ДТ-01 представлены на рис. 7.

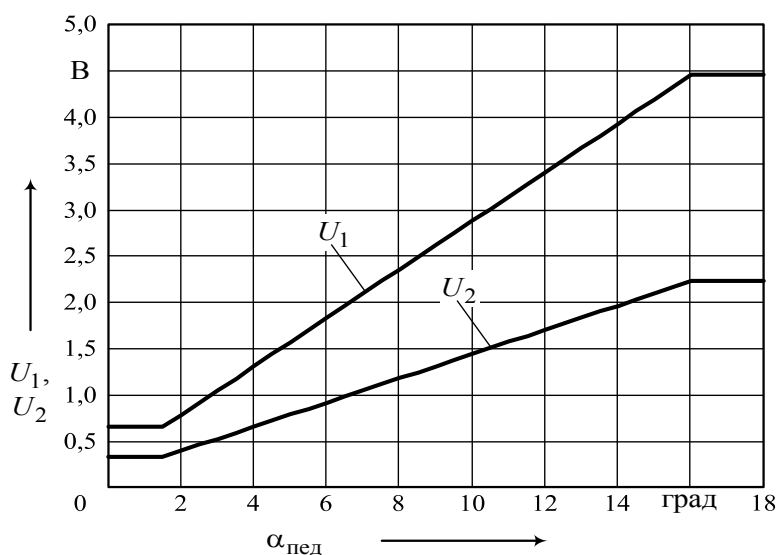


Рис. 6. Характеристики выходных сигналов датчика положения педали акселератора

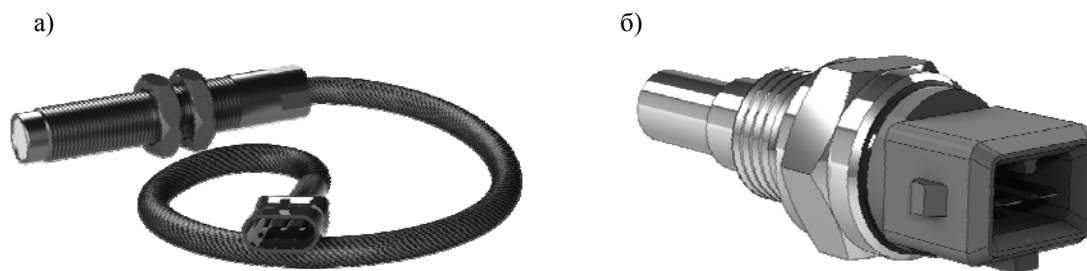


Рис. 7. Внешний вид датчиков частоты вращения ДЧИ-10 (а) и температуры ДТ-01 (б)

Датчик ДЧИ-10 импульсного типа. Количество импульсов за один оборот контролируемого вала равно числу выступов вращающегося ферромагнитного элемента, в качестве которого используется любое зубчатое колесо коробки передач ГМП. Датчик крепится в корпусе коробки передач на резьбе М20×1.

Для проведения исследовательских испытаний компонентов МСАУ на кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета создана экспериментальная установка, функциональная схема которой приведена на рис. 8. Она включает в себя следующие компоненты: 1 – опытный образец контроллера ГМП; 2 – плата сбора данных National Instruments USB-6343; 3 – персональный компьютер; 4 – селектор режимов управления ГМП; 5 – панель индикации ЭПП-08 для вывода информации, используемая штатно на самосвалах БелАЗ (разработчик – фирма УП «Сенсор-плюс», г. Минск); 6 – электронная педаль акселератора; 7 – блок тумблеров; 8 – блок потенциометров; 9 – блок светодиодов; 10 – CAN-шина.

На экспериментальной установке проводится имитация процессов управления ГМП с целью оценки полноты и качества выполнения МСАУ всех предусмотренных функций. Имитируются режимы движения, наиболее характерные для карьерного самосвала: разгон порожнего и груженого автомобиля с места по горизонтальной дороге в режиме автоматического и ручного переключения передач; движение карьерного самосвала в гору с заданными укло-

нами при автоматическом и ручном переключении передач; движение задним ходом; аварийный режим управления.

Имитация процесса движения автомобиля осуществляется на персональном компьютере 3 на основе математической модели карьерного самосвала БелАЗ-7555Е, реализованной в программном продукте MATLAB (Simulink). Интегрирование дифференциальных уравнений математической модели происходит в режиме реального времени. В этом же режиме производится обмен информацией с контроллером 1 через CAN-шину 10.

От контроллера в компьютер поступает информация о номере передачи и включаемых фрикционах ГМП, положении педали акселератора 6, состоянии рабочего и стояночного тормозов. В контроллер передается информация о частотах вращения вала двигателя, турбинного колеса ГДТ, промежуточного и выходного валов ГМП, значения которых получают на основе математического моделирования процесса движения самосвала. Математическая модель карьерного самосвала позволяет имитировать различные режимы движения.

Имитация сигналов о положениях органов управления карьерным самосвалом в экспериментальной установке реализована с помощью электронной педали акселератора 6, селектора режимов управления 4, блока тумблеров 7 и блока потенциометров 8. Блок тумблеров состоит из шести тумблеров, имитирующих источники информации о режимах работы ГМП: датчик засорен-

ности фильтра ГМП, дискретный датчик положения педали рабочей тормозной системы, кнопку включения тормоза-замедлителя, датчик включения стояночной тормозной системы, дискретный датчик положения грузовой платформы, кнопку аварийного управления ГМП.

Блок потенциометров включает в себя три потенциометра, позволяющие имитировать датчики температуры масла ГМП и охлаждающей жидкости двигателя и датчик давления масла главной гидромагистрали системы управления ГМП.

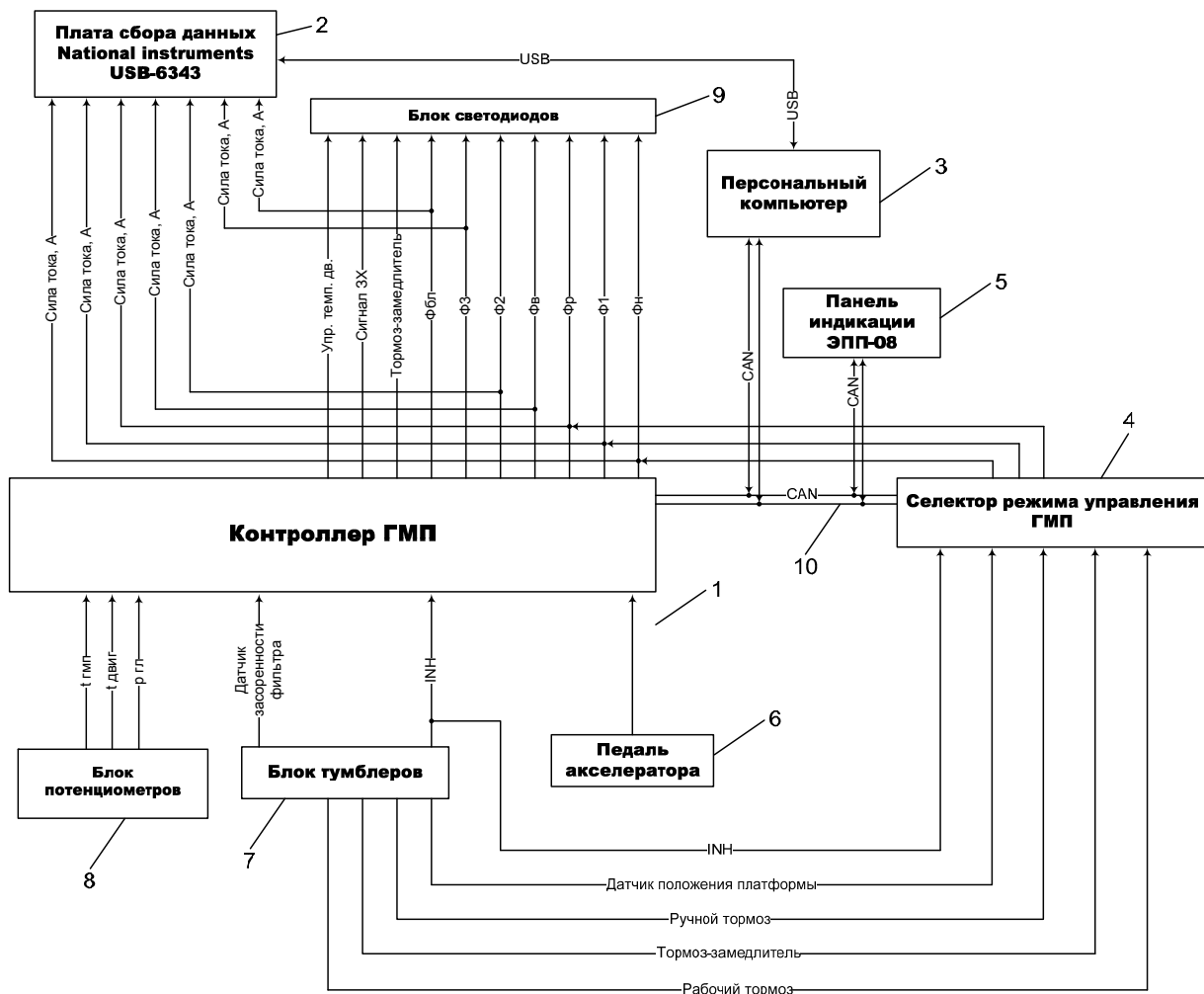


Рис. 8. Принципиальная схема экспериментальной установки для испытаний МСАУ

Для индикации состояния дискретных выходов и ШИМ-выходов контроллера экспериментальная установка оснащена блоком светодиодов 9. С помощью дисплея 5 осуществляется контроль состояния мехатронной системы управления в режиме реального времени. Измерение управляющих сигналов ШИМ-выходов контроллера в процессе

переключения передач производится посредством платы сбора данных 6 USB-6343.

Исполнительная программа контроллера аналогична исполнительной программе мехатронной системы реального карьерного самосвала, за исключением блока обработки сигналов с датчиков частоты вращения валов ГМП. В

данной исполнительной программе информация о частотах вращения вала двигателя, турбинного колеса ГМП, промежуточного и выходного валов ГМП в контроллер поступает по CAN-шине от персонального компьютера 3, который производит вычисления значений на основе математической мо-

дели движения самосвала, реализуемой в MATLAB.

Проведенные исследования показали высокую эффективность и работоспособность созданной МСАУ. Применение её на карьерных самосвалах БелАЗ позволяет повысить их технический уровень и конкурентоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами : монография / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 512 с. : ил.
2. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин : монография / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.
3. **Тарасик, В. П.** Синтез алгоритма автоматического переключения передач автомобиля с гидромеханической трансмиссией / В. П. Тарасик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 46–58.
4. **Тарасик, В. П.** Алгоритмы автоматического переключения передач автомобиля с гидромеханической трансмиссией / В. П. Тарасик, Р. В. Плякин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 38–49.
5. Мехатронная система автоматического управления ГМП карьерного самосвала / В. П. Тарасик [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 12–15.
6. **Тарасик, В. П.** Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, Р. В. Плякин // Грузовик. – 2011. – № 2. – С. 2–11.
7. **Тарасик, В. П.** Электрогидравлический механизм управления фрикционами гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 89–100.
8. Селектор режимов управления автоматической трансмиссией автомобиля / В. П. Тарасик [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 102–111.
9. Способ управления автоматической двухдиапазонной коробкой передач и устройство для его осуществления : пат. RU 2 424 927, МПК В60W 10/10. / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, И. М. Дычкин, Р. В. Плякин ; заявл. 16.03.09 ; опубл. 27.07.11, Бюл. № 21.
10. Двухступенчатый электрогидравлический механизм управления давлением : пат. RU 2 459 982, МПК F15B 13/043; F16H 61/06. / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, И. М. Дычкин, Р. В. Плякин ; опубл. 27.08.12, Бюл. № 24.
11. Устройство для выбора режимов управления автоматической трансмиссией автомобиля : пат. RU 2 491 459, МПК F16H 59/04; F16H 61/24 / В. П. Тарасик, Г. Л. Антипенко, В. И. Курстак, И. М. Дычкин ; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24.

Статья сдана в редакцию 12 марта 2015 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: avto@bru.mogilev.by

Николай Николаевич Горбатенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: avto@bru.mogilev.by

Роман Владимирович Плякин, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: romanp@tut.by.

Виктор Сергеевич Савицкий, ведущий инженер, Белорусско-Российский университет. E-mail: 6270487@gmail.com.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: avto@bru.mogilev.by.

Nikolai Nikolayevich Gorbatenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: harb_60@tut.by.

Roman Vladimirovich Pliakin, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: romanp@tut.by.

Viktor Sergeyevich Savitsky, principal engineer, Belarusian-Russian University. E-mail: 6270487@gmail.com.

УДК 629.3

В. П. Тарасик, Ю. С. Романович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

UDC 629.3

V. P. Tarasik, Y. S. Romanovich

MODELING OF GEAR SHIFT OF VEHICLES WITH HYDROMECHANICAL TRANSMISSION

Аннотация

Приведены результаты моделирования процесса переключения передач карьерного самосвала с автоматической гидромеханической трансмиссией. Рассмотрены различные варианты управления фрикционами при переключении передач, дана оценка их влияния на показатели качества переходных процессов в трансмиссии автомобиля.

Ключевые слова:

гидромеханическая трансмиссия, коробка передач, фрикцион, время регулирования, перекрытие характеристик переключения передач, баланс энергии.

Abstract

The results of modeling the gear shift process of a quarry dump truck with automatic hydromechanical transmission are presented. Different variants of friction clutch control during gear shifting are considered, their impact on the quality rating of transient processes in the vehicle transmission is assessed.

Key words:

hydromechanical transmission, gearbox, friction clutch, control time, overlap of gear shift characteristics, energy balance.

В автомобилях широко применяются автоматические трансмиссии. Это позволяет существенно улучшить реализацию потенциальных тягово-скоростных свойств автомобиля, повысить безопасность движения и создать комфортные условия управления автомобилем [1–6].

К автоматическим трансмиссиям предъявляется широкий комплекс специфических требований, обуславливающий необходимость научного поиска решений и разработки технических средств для их реализации. Одно из важнейших требований к автоматическим трансмиссиям заключается в обеспечении непрерывного подвода энергии

двигателя к ведущим колесам автомобиля при переключении передач для получения высокой средней скорости движения на маршруте и снижения дискомфорта водителя и пассажиров в момент переключения. Это достигается путем соответствующего выбора характеристик управления переключением передач.

Рассмотрим данную проблему на примере гидромеханической передачи карьерного самосвала БелАЗ-7555Е грузоподъемностью 60 т. Гидромеханическая передача (ГМП) состоит из гидродинамического трансформатора (ГДТ) и многоступенчатой коробки передач (КП), передачи в которой переключают

посредством многодисковых фрикционов с гидроприводом управления [7].

На рис. 1 представлена конструкция коробки передач. Основные элементы КП: входной вал 18, промежуточный вал 23, выходной вал 27, вал реверса 13 и шесть фрикционов. Фрикцион первой передачи 11 и фрикцион передачи реверса 9 расположены на

валу реверса 13, на входном валу 18 установлены фрикционы второй 7 и третьей 20 передач. На промежуточном валу 23 размещены фрикционы понижающего 5 и повышающего 22 диапазонов. Такая конструктивная схема позволяет получить 6 передач переднего хода и 2 передачи реверса.

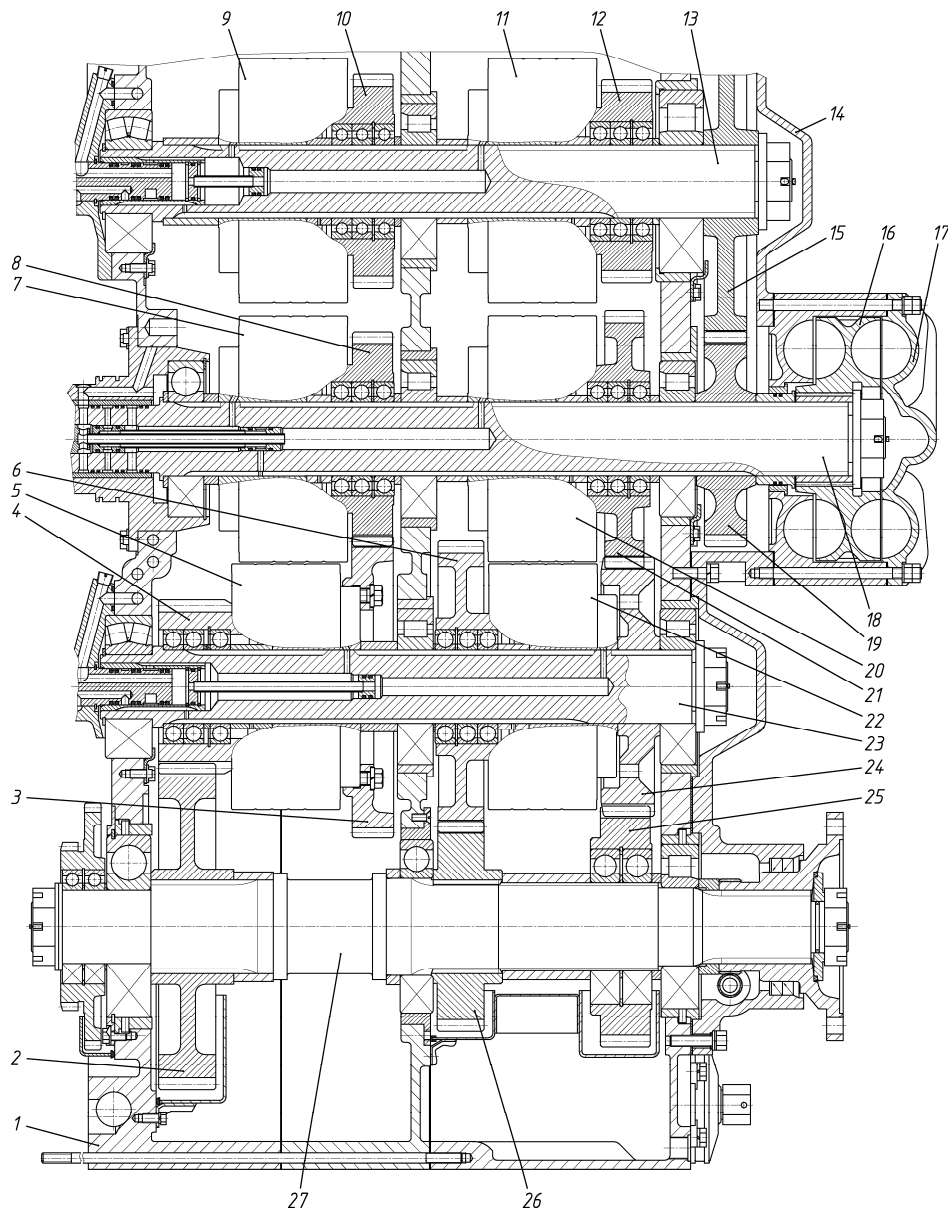


Рис. 1. Коробка передач карьерного самосвала БелАЗ-7555Е

Процесс переключения передач продемонстрируем на примере перехода со второй на третью передачу. Для его

осуществления необходимо выключить фрикцион 7 второй передачи, а вместо него замкнуть фрикцион 20 третьей пере-

дачи. Фрикционы же диапазонов 5 и 22 в этом процессе не принимают участия: первый из них остается в замкнутом состоянии, а второй – в разомкнутом.

Для непрерывной передачи потока энергии через механизмы КП цепь передачи энергии должна быть замкнутой. Это достигается выбором характеристик управления включаемым и выключаемым фрикционами, участвующими в переключении передачи, и соответствующим согласованием этих характеристик во времени протекания процесса управления. Такой характер управления называют переключением передач с перекрытием. При этом происходит перекрытие во времени характеристик управления фрикционами.

Однако при переключении передач с перекрытием в цепи передачи энергии возникают замкнутые контуры, в которых происходит циркуляция энергии, что может привести к существенному возрастанию нагрузок в механизмах коробки передач.

В научной литературе по авто-тракторостроению распространены термины «циркуляция мощности» и «переключение передач без разрыва потока мощности». Мощность – это характеристика изменения потока энергии во времени, т. е. производная энергии по времени. От двигателя к ведущим колесам автомобиля передаётся (поступает) поток энергии, а не поток мощности, поэтому упомянутые термины некорректны: вместо слова «мощность» необходимо употреблять «энергия». Параметрами потока энергии при ее передаче посредством вращательного движения являются вращающий момент (потенциал энергии) и угловая скорость (фазовая координата носителя потока энергии – сосредоточенной массы). Термин «крутящий момент» в данном случае неприменим, поскольку он отображает явление кручения, скручивания стержней (валов), т. е. определяет де-

формации и напряжения кручения [11, т. 13, с. 501]. Термин же «вращающий момент» отображает вид движения, при котором передаётся поток энергии [11, т. 5, с. 425]. Его применял основоположник теории автомобиля академик Е. А. Чудаков [10, с. 16]. Он также используется в учебной и научной литературе и стандартах по электроприводам. Термины «крутящий момент», «изгибающий момент» свойственны сопромату, а не механике.

Предположим, что осуществляется переключение с перекрытием со второй на третью передачу в коробке передач, представленной на рис. 1. В этом случае начинают осуществлять процесс сжатия фрикционных дисков фрикциона третьей передачи 20 с некоторым опережением по отношению к моменту выключения фрикциона второй передачи 7. В результате образуется замкнутый контур циркуляции энергии, в который входят следующие составляющие элементы КП: включаемый фрикцион 20 третьей передачи (находится в режиме буксования) – зубчатые колеса 21 и 24 третьей передачи – участок промежуточного вала 23 между ведомыми шестернями 24 и 3 третьей и второй передач – зубчатые колёса 3 и 8 второй передачи – фрикцион второй передачи 7 (замкнут) – участок входного вала 18 между фрикционами 7 и 20 соответственно второй и третьей передач.

Для определения нагрузок в механизмах образовавшегося замкнутого контура и величины циркулирующей в нём энергии в процессе переключения передачи необходима разработка соответствующей динамической модели коробки передач, позволяющей учесть отмеченные особенности процесса и физические свойства объекта моделирования. Приведенные в [1–7] динамические модели с линейной цепью передачи энергии для решения поставленной задачи неприемлемы.

На рис. 2 представлена разработанная авторами оригинальная динамическая модель гидромеханической трансмиссии карьерного само-

свала БелАЗ-7555Е, позволяющая исследовать процессы переключения передач с перекрытием характеристик управления фрикционами.

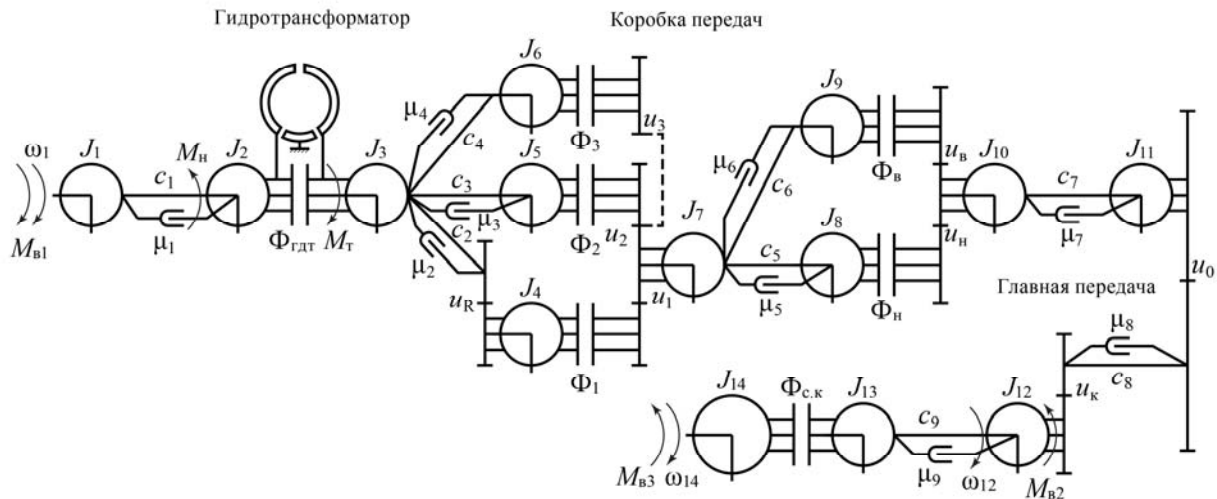


Рис. 2. Динамическая модель трансмиссии

Расшифровка обозначений, принятых на рис. 2, приведена в [8].

В коробке передач для исследования переключений между первой, второй и третьей передачами выделены три замкнутых контура. Например, при переключении со второй передачи на третью в замкнутый контур входят упругие элементы с параметрами жёсткости c_3 и c_4 , фрикционы второй и третьей передач Φ_2 и Φ_3 , зубчатые передачи с передаточными числами этих передач u_2 и u_3 . Для моделирования процессов переключения диапазонов также выделен замкнутый контур, в составе которого упругие элементы с параметрами c_5 и c_6 , фрик-

ционы включения низшего и высшего диапазонов Φ_n и Φ_v , зубчатые передачи с передаточными числами этих диапазонов u_n и u_v .

На основе структурно-матричного метода [9] по данной динамической модели составлена математическая модель исследуемой трансмиссии. Она включает топологические уравнения, описывающие структуру динамической модели и взаимодействие её элементов, и компонентные уравнения упругих и диссипативных элементов. Полностью приведём только топологические уравнения:

$$\begin{aligned}
\frac{d\omega_1}{dt} &= (M_{B1} - M_{y,d1})/J_1; \\
\frac{d\omega_2}{dt} &= [M_{y,d1} - M_H - M_{\phi,ГТ} \text{sign}(\omega_2 - \omega_3)(1 - L_{ГТ}) - (M_{y,d2} + M_{y,d3} + M_{y,d4})L_{ГТ}P_{ГТ}]/(J_2 + J_3L_{ГТ}); \\
\frac{d\omega_3}{dt} &= [M_T + M_{\phi,ГТ} \text{sign}(\omega_2 - \omega_3)(1 - L_{ГТ}) + M_{y,d1}L_{ГТ}P_{ГТ} - M_{y,d2} - M_{y,d3} - M_{y,d4}]/(J_2L_{ГТ} + J_3); \\
\frac{d\omega_4}{dt} &= \left\{ M_{y,d2}u_R\eta_R - \left[M_{\phi 1} \text{sign}(\omega_4 - \omega_7u_1)(1 - L_1) + \frac{(M_{y,d5} + M_{y,d6})L_1P_1}{u_1\eta_1} \right] D_1 \right\} / \left(J_4 + \frac{J_7L_1D_1}{u_1^2} \right); \\
\frac{d\omega_5}{dt} &= \left\{ M_{y,d3} - \left[M_{\phi 2} \text{sign}(\omega_5 - \omega_7u_2)(1 - L_2) + \frac{(M_{y,d5} + M_{y,d6})L_2P_2}{u_2\eta_2} \right] D_2 \right\} / \left(J_5 + \frac{J_7L_2D_2}{u_2^2} \right); \\
\frac{d\omega_6}{dt} &= \left\{ M_{y,d4} - \left[M_{\phi 3} \text{sign}(\omega_6 - \omega_7u_3)(1 - L_3) + \frac{(M_{y,d5} + M_{y,d6})L_3P_3}{u_3\eta_3} \right] D_3 \right\} / \left(J_6 + \frac{J_7L_3D_3}{u_3^2} \right); \\
\frac{d\omega_7}{dt} &= \left\{ [M_{\phi 1} \text{sign}(\omega_4 - \omega_7u_1)(1 - L_1) + M_{y,d2}u_R\eta_Ru_1\eta_1L_1P_1]D_1 + \right. \\
&\quad + [M_{\phi 2} \text{sign}(\omega_5 - \omega_7u_2)(1 - L_2) + M_{y,d3}u_2\eta_2L_2P_2]D_2 + \\
&\quad + [M_{\phi 3} \text{sign}(\omega_6 - \omega_7u_3)(1 - L_3) + M_{y,d4}u_3\eta_3L_3P_3]D_3 - M_{y,d5} - M_{y,d6} \Big\} / \\
&\quad \left(J_7 + J_4u_1^2L_1D_1 + J_5u_2^2L_2D_2 + J_6u_3^2L_3D_3 \right); \\
\frac{d\omega_8}{dt} &= \left\{ M_{y,d5} - \left[M_{\phi H} \text{sign}(\omega_8 - \omega_{10}u_H)(1 - L_H) + \frac{M_{y,d7}L_HP_H}{u_H\eta_H} \right] D_H \right\} / \left(J_8 + \frac{J_{10}L_HD_H}{u_H^2} \right); \\
\frac{d\omega_9}{dt} &= \left\{ M_{y,d6} - \left[M_{\phi B} \text{sign}(\omega_9 - \omega_{10}u_B)(1 - L_B) + \frac{M_{y,d7}L_BP_B}{u_B\eta_B} \right] D_B \right\} / \left(J_9 + \frac{J_{10}L_BD_B}{u_B^2} \right); \\
\frac{d\omega_{10}}{dt} &= \left\{ [M_{\phi H} \text{sign}(\omega_8 - \omega_{10}u_H)(1 - L_H) + M_{y,d5}u_H\eta_HL_HP_H]D_H + \right. \\
&\quad + [M_{\phi B} \text{sign}(\omega_9 - \omega_{10}u_B)(1 - L_B) + M_{y,d6}u_B\eta_BL_BP_B]D_B - M_{y,d7} \Big\} / \left(J_{10} + J_8u_H^2L_HD_H + J_9u_B^2L_BD_B \right); \\
d\omega_{11}/dt &= [M_{y,d7} - M_{y,d8}/(u_0\eta_0)]/J_{11}; \\
d\omega_{12}/dt &= (M_{y,d8}u_K\eta_K - M_{y,d9} - M_{B2})/J_{12}; \\
d\omega_{13}/dt &= [M_{y,d9} - M_{\phi K} \text{sign}(\omega_{13} - \omega_{14})(1 - L_K) - M_{B3}L_KP_K]/(J_{13} + J_{14}L_K); \\
d\omega_{14}/dt &= [M_{\phi K} \text{sign}(\omega_{13} - \omega_{14})(1 - L_K) + M_{y,d9}L_KP_K - M_{B3}]/(J_{14} + J_{13}L_K).
\end{aligned} \tag{1}$$

Компонентные уравнения упругих элементов были составлены в дифференциальной форме $dM_{yi}/dt = f(c_i, \omega_j)$. В результате общий порядок системы дифференциальных уравнений равен 19. Методика составления уравнений изло-

жена в [9].

В уравнениях (1) $M_{y,di} = M_{yi} + M_{di}$, где M_{yi} – момент i -го упругого элемента; M_{di} – момент i -го диссипативного элемента; L_j, P_j, D_j – дискретные функ-

ции: L_j – функция состояния j -го фрикциона (при $L_j = 0$ фрикцион буксует; при $L_j = 1$ – замкнут); P_j – функция размыкания замкнутого фрикциона при недостаточном моменте трения; D_j – функция управления фрикционом

(при $D_j = 1$ включён механизм управления j -м фрикционом, его гидроцилиндр находится под давлением рабочей жидкости $p_{\phi j}$ (рис. 3); при $D_j = 0$ гидроцилиндр фрикциона соединён со сливом).

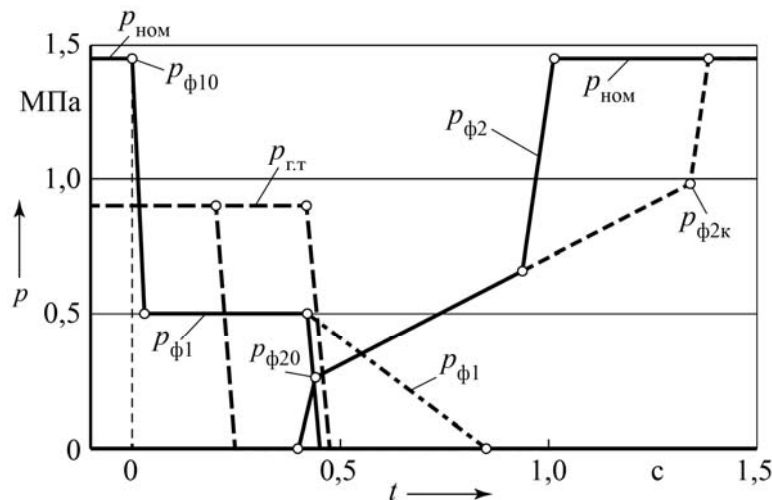


Рис. 3. Характеристики управления фрикционами

Функцию состояния j -го фрикциона можно найти из выражения

$$L_j = \begin{cases} 1 & \text{при } |\omega_{\text{вдш}j} - \omega_{\text{вдм}j}| \leq \Delta\omega; \\ 0 & \text{при } |\omega_{\text{вдш}j} - \omega_{\text{вдм}j}| > \Delta\omega, \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega_{\text{вдш}j}$, $\omega_{\text{вдм}j}$ – угловые скорости соответственно ведущего и ведомого фрикционных элементов; $\Delta\omega$ – допустимая разность между $\omega_{\text{вдш}j}$ и $\omega_{\text{вдм}j}$, определяющая условия замыкания фрикциона (принимают $\Delta\omega$ в пределах 0,01...0,001 рад/с).

После замыкания фрикциона необходимо принять $\omega_{\text{вдм}j} = \omega_{\text{вдш}j}$.

Функция размыкания фрикциона определяется из выражения

$$P_j = 0,5 \left[1 + \text{sign} \left(M_{\phi j} - |M_{y.dk} \pm J_i \varepsilon_i| \right) \right], \quad (3)$$

где $M_{y.dk}$ – суммарный момент k -х упругого и диссипативного элементов, примыкающих к i -й массе на входе или выходе фрикциона; J_i , ε_i – момент инерции и угловое ускорение i -й массы. Если масса расположена на входе фрикциона, принимается знак «минус», а если на выходе – «плюс».

Коэффициент трения μ_{ϕ} при буксовании фрикциона вычисляется по формуле

$$\mu_{\phi} = \mu_{\min} + (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \times \exp(-k_e r_{\phi} |\omega_{\text{вдш}} - \omega_{\text{вдм}}|), \quad (4)$$

где $\mu_{\min}$, $\mu_{\max}$ – минимальное и максимальное значения коэффициента трения; k_e – коэффициент экспоненты; r_{ϕ} – средний радиус трения фрикционных дисков, м.

Принимается $\mu_{\min} = 0,06$, $\mu_{\max} = 0,1$, $k_e = 0,265$, а коэффициент сцепления $\varphi = 0,12$.

Рассмотрим результаты исследований, выполненных на основе разработанной математической модели при переключении $2 \rightarrow 3$. Имитировалось движение самосвала в карьере «Гранит» (г. Микашевичи, Брестская обл.).

На рис. 3 показаны характеристики управления фрикционами гидромеханической передачи. Они представляют собой графики изменения во времени давления рабочей жидкости p , подаваемой в гидроцилиндры фрикциона.

Выполнено моделирование четырех вариантов характеристик управления. В вариантах 1 и 2 переключение осуществлялось с нулевым перекрытием характеристик управления фрикционами Φ_2 и Φ_3 второй и третьей передач, а в вариантах 3 и 4 производилось переключение с положительным перекрытием. На время переключения передачи гидротрансформатор разблокировали, выключая фрикцион блокировки $\Phi_{\text{ГДТ}}$. В вариантах 1 и 3 выключение $\Phi_{\text{ГДТ}}$ выполнялось в момент подачи сигнала на включение фрикциона Φ_3 , а в вариантах 2 и 4 – с опережением на 0,2 с. В гидроциindre выключаемого фрикциона Φ_2 давление предварительно снижалось ступенчато до величины $p_{\Phi 2} = 0,5$ МПа за 0,4 с до начала включения Φ_3 , а затем в вариантах 1 и 2 резко снижалось до нуля, что соответствовало условию переключения с нулевым перекрытием. В вариантах 3 и 4 на интервале времени нарастания давления $p_{\Phi 3}$ в гидроциindre фрикциона Φ_3 осуществлялось постепенное плавное снижение давления $p_{\Phi 2}$ в гидроциindre фрикциона Φ_2 (штрихпунктирная линия на рис. 3), что позволяло имитировать переключение с положительным перекрытием характеристик управления

фрикционами. Время перекрытия составляло 0,4 с.

Предусмотрена возможность процесса регулирования давления в гидроциindre выключаемого фрикциона t_p на интервале времени $t_p = 0,9$ с, что позволяло его плавно включить при любых дорожных условиях и уровнях нагрузки автомобиля. Но в момент замыкания фрикциона Φ_3 давление сразу же поднималось до номинального значения $p_{\text{ном}}$ с целью предотвращения перехода его в режим буксования.

На рис. 4, а представлены графики изменения во времени удельной мощности $P_{\Phi 3}$ и удельной работы $W_{\Phi 3}$ фрикциона Φ_3 , а на рис. 4, в – приращения поверхностной $\Delta T_{\text{п.}\Phi 3}$ и объёмной $\Delta T_{\text{об.}\Phi 3}$ температуры фрикционных дисков при переключении с нулевым перекрытием. На рис. 4, б и г показаны графики изменения характеристик тех же процессов при переключении с перекрытием.

Значения $P_{\Phi 3}$, $W_{\Phi 3}$, $\Delta T_{\text{п.}\Phi 3}$, $\Delta T_{\text{об.}\Phi 3}$ в последнем случае оказались существенно выше, чем в первом. Кроме того, происходит буксование выключаемого фрикциона Φ_2 , что отображается графиком его удельной мощности $P_{\Phi 2}$. Но $P_{\Phi 2}$ значительно меньше в сравнении с $P_{\Phi 3}$ в связи с малым временем буксования фрикциона Φ_2 , что обусловлено слишком большой разницей в значениях статического и динамического коэффициентов трения используемого фрикционного материала. Их значения различаются практически в 2 раза. Таким образом, теплонапряжённость работы фрикционов при переключении с перекрытием существенно возрастает.

Для оценки влияния характеристик управления на нагрузки механизмов трансмиссии рассмотрим полученные графики изменения вращающих

моментов, приведенные на рис. 5, *a–z*. Индексы i в обозначениях моментов упругих элементов M_{yi} соответствуют

номерам индексов параметров этих элементов на рис. 2.

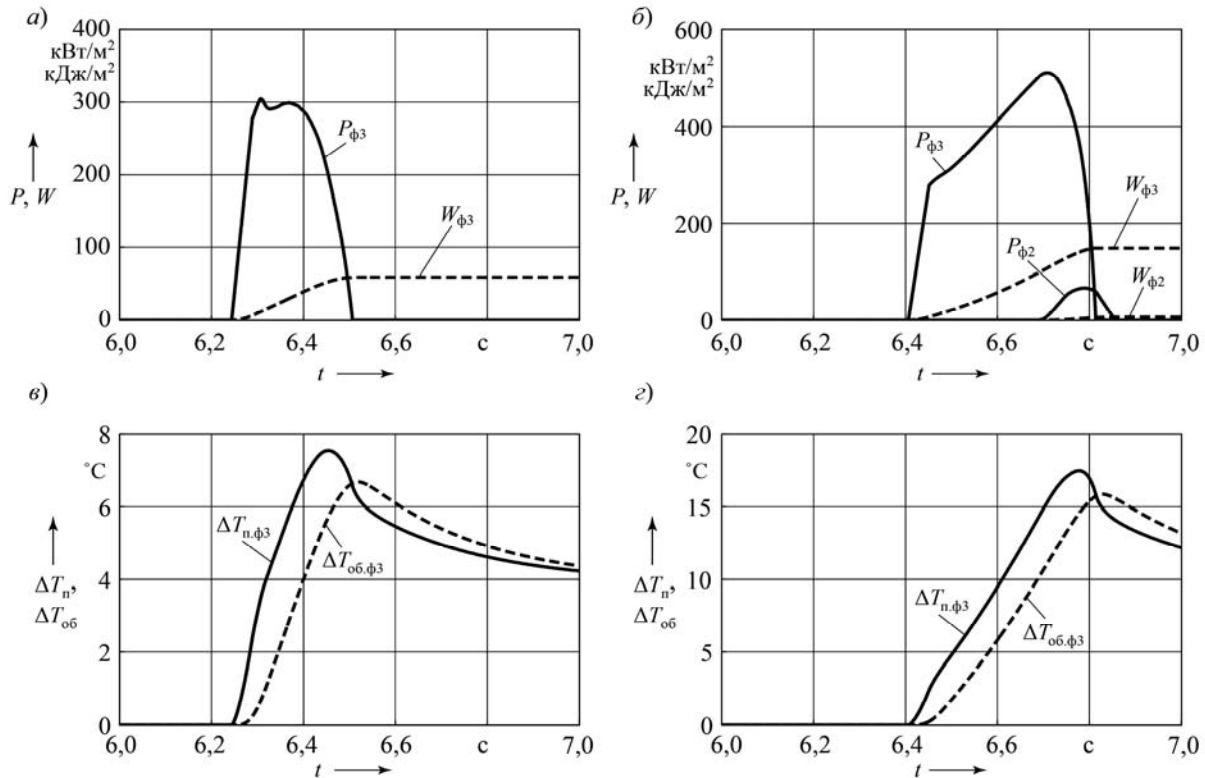


Рис. 4. Графики показателей теплонапряженности работы фрикционов коробки передач

Упругие элементы с параметрами c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 отображают физические свойства валов коробки передач, а упругий элемент c_7 – карданного вала (см. рис. 2). При переключении передачи с нулевым перекрытием (рис. 5, *a* и *в*) фрикцион Φ_2 выключается практически одновременно с началом буксования фрикциона Φ_3 включаемой передачи, поэтому энергия в коробку передач в основном поступает через упругий элемент c_4 и далее передаётся к упругому элементу c_5 , и замкнутый контур циркуляции энергии не образуется. Небольшие колебания момента M_{y3} после выключения фрикциона Φ_2 обусловле-

ны колебаниями массы J_5 и выделяемой ею накопленной кинетической энергией.

При переключении передачи с перекрытием (рис. 5, *б* и *з*) буксование фрикциона Φ_3 начинается и происходит в течение некоторого времени при замкнутом состоянии фрикциона Φ_2 . Вследствие этого образуется замкнутый контур циркуляции энергии, в который вовлекаются упругие элементы c_3, c_4 , фрикционы Φ_2, Φ_3 и зубчатые передачи с передаточными числами u_2 и u_3 второй и третьей передач. В результате в упругом элементе c_3 возникает отрицательный момент M_{y3} ,

что приводит к существенному возрастанию момента M_{y4} в упругом элементе c_4 и, как следствие, увеличению моментов в упругих элементах M_{y5} и M_{y7} , т. е. на промежуточном и выход-

ном валах КП и на карданном валу, что видно из рис. 5, *г*. Но минимальные их значения, наоборот, меньше, чем в вариантах переключения с нулевым перекрытием, что влечет за собой замедление автомобиля и потерю скорости.

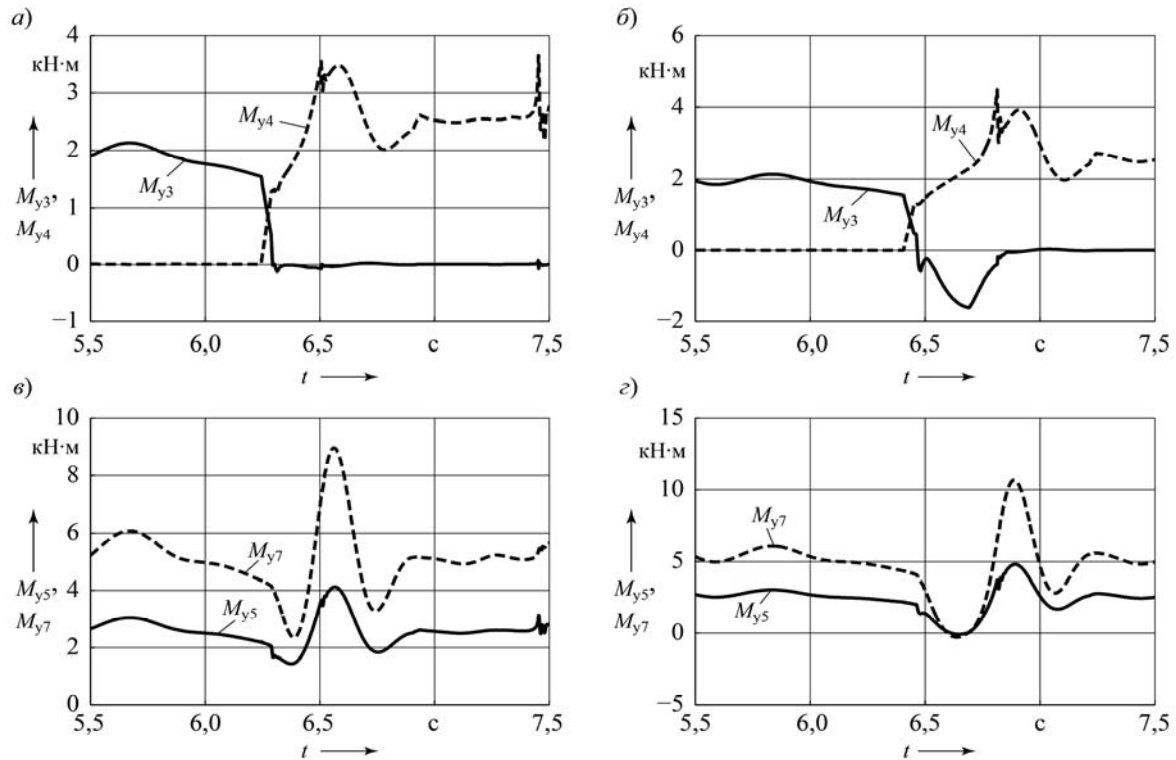


Рис. 5. Графики динамических нагрузок на валах трансмиссии при переключении передачи

На рис. 6, *а* и *б* показаны графики изменения во времени ускорения автомобиля, а на рис. 6, *в* и *г* – скорости движения в процессе переключения передачи. Очевидно, что характеристики управления фрикционами оказывают существенное влияние на параметры движения автомобиля. При переключении с перекрытием возрастает максимальное значение ускорения $a_{\max}$ и амплитуда его колебания $\Delta a = a_{\max} - a_{\min}$, увеличивается потеря скорости за время переключения (см. рис. 6, *г*), ухудшается плавность движения и комфортность ав-

томобиля.

В табл. 1 приведены значения исследуемых параметров. Эти параметры представляют собой показатели качества процесса переключения передач. Дана оценка соотношения показателей в процентах.

За 100 % приняты значения показателей, полученные в первом варианте, соответствующем переключению с нулевым перекрытием и совмещением момента времени выключения фрикциона блокировки ГДТ $\Phi_{\text{ГДТ}}$ с моментом включения фрикциона Φ_3 .

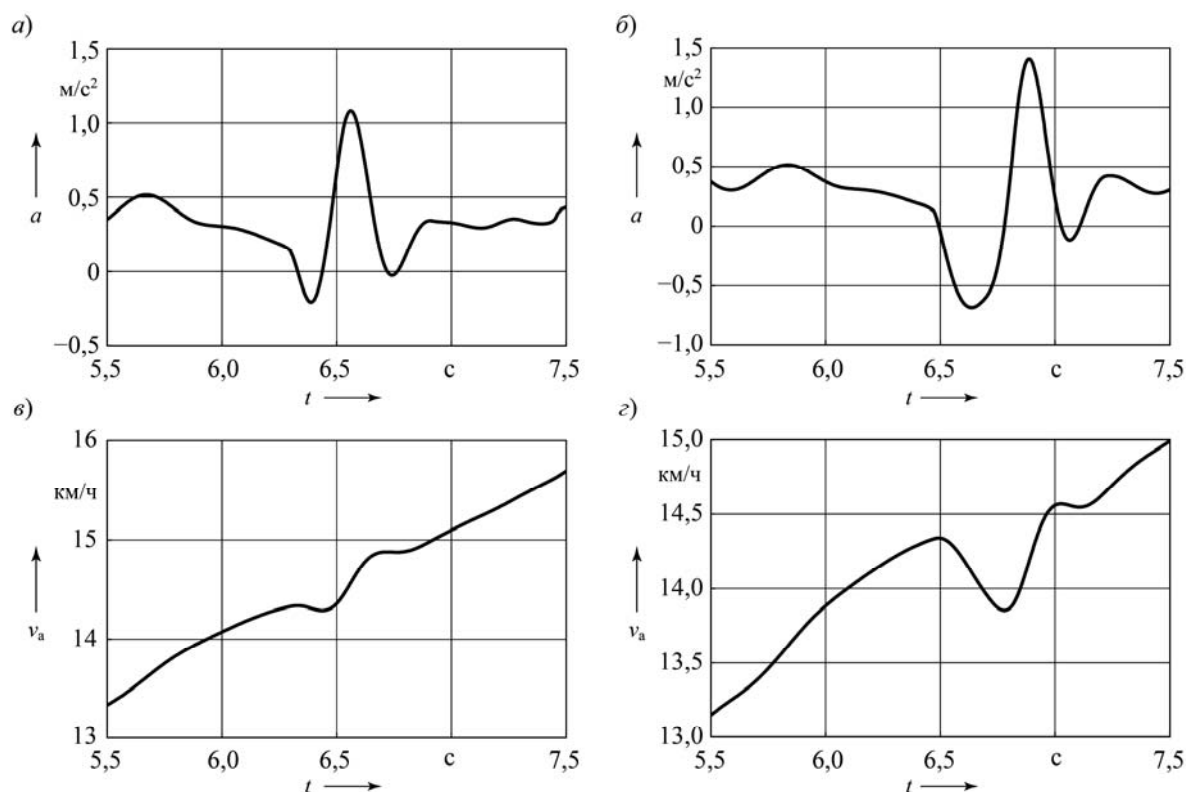


Рис. 6. Графики ускорения и скорости автомобиля при переключении передачи

Табл. 1. Значения показателей качества процесса переключения передач

Параметры	Вариант управления фрикционами			
	без перекрытия		с перекрытием	
	1	2	3	4
Время буксования фрикциона Φ_3 , с (%)	0,263 (100)	0,327 (125)	0,408 (155)	0,421 (161)
Удельная работа буксования, kJ/m^2 (%): фрикциона Φ_3 фрикциона Φ_2	58,9 (100) 0	81,3 (138) 0	148,3 (252) 5,2	158,9 (270) 3,0
Удельная мощность буксования, kW/m^2 (%): фрикциона Φ_3 фрикциона Φ_2	304,8 (100) 0	308,9 (101) 0	511,1 (168) 65,9	530,4 (174) 47,1
Температура фрикционных дисков, град (%)	7,6 (100)	10,0 (133)	17,5 (232)	18,8 (249)
Максимальный вращающий момент, Н·м (%): на турбине ГДТ на входном валу КП в замкнутом контуре КП на карданном валу	3104 (100) 3557 (100) -119 (100) 8969 (100)	3342 (108) 3974 (112) -475 (399) 7479 (83)	3696 (119) 4490 (126) -1610 (1359) 10670 (119)	3669 (118) 4569 (129) -1248 (1053) 10540 (118)
Ускорение автомобиля, m/s^2 : максимальное минимальное	1,08 (100) -0,20 (100)	0,79 (73) -0,39 (195)	1,41 (131) -0,68 (340)	1,39 (129) -0,39 (195)
Джерк, m/s^3 : максимальный минимальный	11,73 (100) -9,88 (100)	8,60 (73) -6,30 (64)	20,70 (176) -13,90 (141)	20,94 (179) -13,56 (137)
Снижение скорости автомобиля за время переключения передачи, %	0,35	1,43	3,42	3,73

На основании полученных результатов можно заключить, что перекрытие передач приводит к существенному увеличению нагрузок в трансмиссии и теплонапряжённости работы фрикциона, ухудшает плавность движения автомобиля, характеризуемую амплитудами изменения ускорения и джерка (скорости изменения ускорения).

Таким образом, рекомендуемое многими специалистами переключение передач с перекрытием не оправдывает возлагаемые на него надежды. Как показывают исследования, наилучшие значения показателей качества процесса переключения достигаются при нулевом перекрытии с синхронным разблокированием ГДТ.

Проведем анализ баланса потока энергии, передаваемой механизмами КП за время буксования t_6 включаемого фрикциона Φ_3 . К коробке передач подводится энергия W_T , генерируемая на валу турбины ГДТ за время t_6 , а также часть накопленной массой J_3 кинетической энергии $\Delta E_{к3}$, выделяемой в связи со снижением ее угловой скорости. Значение энергии W_T , Дж, вычисляется по формуле

$$W_T = \int_0^{t_6} M_T \omega_T dt, \quad (1)$$

где M_T – вращающий момент турбины, Н·м; ω_T – угловая скорость вращения турбины, рад/с.

Изменение кинетической энергии i -й массы КП за время t_6 соответствует выражению

$$\Delta E_{ки} = \frac{J_i}{2} (\omega_{hi}^2 - \omega_{ki}^2), \quad (2)$$

где ω_{hi} , ω_{ki} – начальная и конечная угловые скорости вращения i -й массы.

Энергия, передаваемая валами КП

за время t_6 , вычисляется по формуле

$$W_{yj} = \int_0^{t_6} M_{yj} \omega_i dt, \quad (3)$$

где W_{yj} – суммарное количество энергии, переданной через j -й упругий элемент (вал КП) за время буксования фрикциона t_6 , Дж; M_{yj} – вращающий момент на j -м упругом элементе, Н·м; ω_i – угловая скорость i -й массы, непосредственно связанной с j -м упругим элементом.

Энергия буксования k -го фрикциона $W_{\Phi k}$, Дж, определяется по формуле

$$W_{\Phi k} = \int_0^{t_6} |M_{\Phi k} \omega_{\Phi k}| dt, \quad (4)$$

где $M_{\Phi k}$ – момент трения фрикциона, Н·м; $\omega_{\Phi k}$ – угловая скорость относительного скольжения фрикционных дисков k -го фрикциона, рад/с.

На рис. 7, а представлена диаграмма баланса энергии при переключении $2 \rightarrow 3$, осуществляемом с нулевым перекрытием передач (вариант характеристик управления 1), а на рис. 7, б – при положительном перекрытии (вариант 3).

Приняты следующие обозначения составляющих баланса энергии: $\Sigma \Delta E_k^+$ – суммарная кинетическая энергия, выделенная массами J_3 , J_4 , J_5 , J_6 за время t_6 в связи со снижением их угловых скоростей; $\Sigma \Delta E_k^-$ – энергия, затраченная на увеличение кинетической энергии массы J_7 в связи с ее разгоном; W_{y3} – количество энергии, передаваемой через упругий элемент c_3 за время t_6 в связи с циркуляцией энергии в замкнутом контуре (знак «минус» в обозначении этой энергии означает, что она передаётся через замкнутый фрикцион Φ_2 к упругому элементу c_3 и далее к

упругому элементу c_4); W_{y4} – количество энергии, передаваемой через упругий элемент c_4 ; W_{y5} – количество энер-

гии, поступающей через упругий элемент c_5 к фрикциону Φ_H понижающего диапазона.

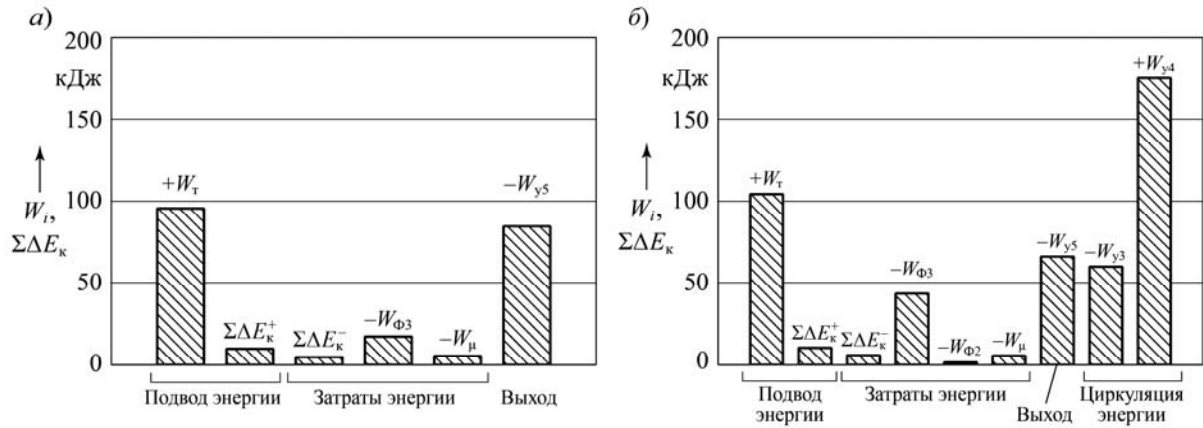


Рис. 7. Диаграммы баланса энергии в коробке передач

В табл. 2 приведены значения составляющих потока энергии, полученные для исследуемых вари-

антов управления фрикционами при переключении $2 \rightarrow 3$.

Табл. 2. Значения составляющих баланса энергии за время буксования фрикциона Φ_3

Составляющая баланса энергии, кДж	Вариант управления фрикционами			
	без перекрытия		с перекрытием	
	1	2	3	4
Энергия гидротрансформатора W_T	95,6	118,8	104,3	108,1
Изменение кинетической энергии масс: $\Sigma \Delta E_k^+$	9,8	11,5	10,4	10,0
$\Sigma \Delta E_k^-$	-4,7	-3,1	-5,8	-5,6
Работа буксования фрикционов: $W_{\phi 3}$	-17,2	-23,8	-43,3	-46,5
$W_{\phi 2}$	0	0	-1,5	-0,9
Работа диссипативных элементов W_{μ}	-5,4	-6,3	-5,6	-5,3
Энергия в контуре циркуляции: W_{y3}	0	0	-59,8	-66,0
W_{y4}	95,7	128,2	175,2	181,2
Энергия на выходе КП W_{y5}	-84,6	-102,6	-66,0	-63,5
КПД $\eta_{к.п.ср}$	0,803	0,787	0,576	0,538

Из представленных диаграмм и табл. 2 видно, что в варианте управления фрикционами 3 в связи с циркуляцией энергии в замкнутом контуре через упругий элемент c_4 передаётся 175,2 кДж энергии, в то время как в варианте 1

только 95,7 кДж, т. е. в 1,83 раза меньше. Это приводит к увеличению максимального значения вращающего момента на данном упругом элементе в 1,26 раза по сравнению с вариантом 1 (см. табл. 1). За тот же период времени

t_6 через упругий элемент c_3 передается 59,8 кДж энергии. Это количество энергии и представляет собой энергию циркуляции, создающую перегрузку участка входного вала коробки передач, расположенного между фрикционами Φ_2 и Φ_3 (см. рис. 1).

Суммарные затраты (потери) энергии в КП

$$W_{\text{пот}} = -(W_{\Phi 3} + W_{\Phi 2} + \Sigma \Delta E_{\text{к}}^- + W_{\mu}). \quad (5)$$

При переключении передач без перекрытия (вариант 1) суммарные потери составляют 27,3 кДж, а с перекрытием они возрастают в 2,06 раза и равны 56,2 кДж. При этом работа буксования $W_{\Phi 3}$ фрикциона Φ_3 увеличивается в 2,52 раза.

Среднее значение КПД коробки передач $\eta_{\text{к.п.ср}}$ за время буксования t_6 фрикциона Φ_3 можно вычислить по формуле

$$\eta_{\text{к.п.ср}} = |W_{y5} / \Sigma W_{\text{подв}}|, \quad (6)$$

где $\Sigma W_{\text{подв}}$ – суммарное количество энергии, подводимое к КП за время t_6 ,

$$\Sigma W_{\text{подв}} = W_{\text{т}} + \Sigma \Delta E_{\text{к}}^+. \quad (7)$$

Значения КПД приведены в табл. 2.

Выводы

1. Предложена новая математическая модель описания физических свойств гидромеханической трансмиссии автомобиля, позволяющая выявлять возникновение замкнутых контуров

циркуляции энергии при переключении передач, исследовать нагрузки элементов этих контуров, их влияние на нагрузки во всех других элементах трансмиссии, теплонапряженность фрикционов и характеристики движения автомобиля в интервале времени переключения передачи.

2. Установлено, что при переключении передачи с перекрытием характеристик управления фрикционами в коробке передач возникает замкнутый контур циркуляции энергии, при этом величина передаваемой энергии в одном из упругих элементов контура, соединяющих между собой включаемый и выключаемый фрикционы, значительно превышает количество энергии, подводимой к коробке передач от двигателя и гидротрансформатора на интервале времени переключения передачи.

3. Положительное перекрытие передач приводит к значительному возрастанию моментов динамической нагрузки всех валов трансмиссии, увеличивает работу буксования фрикциона включаемой передачи, амплитуду изменения ускорения автомобиля и величину падения его скорости на интервале времени переключения, ухудшает комфортность автомобиля.

4. Оптимальные значения показателей качества процесса переключения передачи достигаются при нулевом перекрытии характеристик управления фрикционами включаемой и выключаемой передач при одновременном синхронном разблокировании гидротрансформатора на время осуществления переключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альгин, В. Б. Расчёт мобильной техники. Кинематика, динамика, ресурс / В. Б. Альгин. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 271 с.
2. Гируцкий, О. И. Электронные системы управления агрегатами автомобиля / О. И. Гируцкий, Ю. К. Есеновский-Лашков, Д. Г. Поляк. – М. : Транспорт, 2000. – 213 с.
3. Нарбут, А. Н. Гидромеханические передачи автомобилей / А. Н. Нарбут. – М. : Гринлайт, 2010. – 192 с.

4. **Мельников, А. А.** Управление техническими объектами автомобилей и тракторов / А. А. Мельников. – М. : Академия, 2003. – 376 с.
5. **Савич, Е. Л.** Легковые автомобили / Е. Л. Савич. – Минск : Новое знание, 2009. – 651 с.
6. **Тарасик, В. П.** Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами: монография / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 512 с. : ил.
7. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин : монография / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.
8. **Тарасик, В. П.** Моделирование процесса нагрева многодисковых фрикционов гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 107–117.
9. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
10. **Чудаков, Е. А.** Избранные труды. Теория автомобиля / Е. А. Чудаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – Т. 1. – 463 с.
11. Большая Советская Энциклопедия : в 30 т. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1970–1978.

Статья сдана в редакцию 31 марта 2015 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: avto@bru.mogilev.by.

Юрий Сергеевич Романович, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: rys@tut.by.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: avto@bru.mogilev.by.

Yury Sergeyevich Romanovich, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: rys@tut.by.

УДК 621.791

Д. И. Якубович, И. А. Лисовая, И. М. Лужанская

СНИЖЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОКРЫТИИ ЭЛЕКТРОДОВ

UDC 621.791

D. I. Yakubovich, I. A. Lisovaya, I. M. Luzhanskaya

DECREASE IN NON-HOMOGENEITY OF WELDED JOINTS AND INCREASE OF THEIR MECHANICAL CHARACTERISTICS WHEN USING MODIFIED POWDER MATERIALS IN ELECTRODE COATING

Аннотация

Представлены результаты исследований по определению влияния модифицированных порошковых материалов на механические свойства наплавленного металла и сварного соединения при дуговой сварке покрытыми электродами. Проанализированы металлографические исследования, показывающие снижение неоднородности наплавленного металла сварных швов.

Ключевые слова:

дуговая наплавка; композиционные наплавочные материалы; модифицированные порошковые материалы; измельчение структуры зерна; снижение неоднородности наплавленного металла.

Abstract

The paper presents the results of research on the impact of modified powder materials on the mechanical properties of deposited metal and a welded joint in arc welding with coated electrodes. The metallographic studies showing a decrease in non-homogeneity of the deposited metal in welded joints have been analyzed.

Key words:

arc deposition; composite deposition materials; modified powder materials; grain structure refinement; decrease in non-homogeneity of deposited metal.

Введение

Анализируя порошковые материалы, вводимые в покрытие электродов для ручной дуговой сварки и наплавки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, можно отметить, что все многообразие используемых систем легирования сплавов на железной основе сводится к применению трех компонентов: Cr, Mn и Si, причем Cr является главным легирующим компонентом, формирующим свойства сплава.

В швах, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами,

наблюдается изменение содержания легирующих элементов как вдоль оси шва, так и от линии сплавления к центральной его части. Получение однородного сварного шва с равномерным распределением химических элементов по его сечению во многих случаях остается нерешенной задачей. Связано это с особенностями кристаллизации наплавленного металла и условиями её протекания. В ряде случаев отличия в концентрации таких элементов, как Mn, Si и Cr, могут быть очень значительными.

Порошкообразные наполнители,

полученные традиционными методами, широко применяются при изготовлении покрытия электродов. Возможности улучшения служебных свойств металлов и их прочностных характеристик при использовании в научной и практической сферах рассмотрены неплохо. Кроме этого, в теории сварочных процессов подробно описаны происходящие процессы плавления и кристаллизации компонентов, входящих в состав покрытия электродов, а также получаемые свойства наплавленного металла [1]. Однако расширение теоретических знаний и практического опыта применения в сварочных технологиях модифицированных порошковых материалов, обеспечивающих снижение уровня химической неоднородности, является перспективной и актуальной задачей.

Наряду со стандартными порошками, все более активно используются новые модифицированные композиционные порошковые материалы, полученные методом механического легирования [2–4], при котором структурообразование происходит при температурах, не превышающих линии солидуса, когда материал находится в твердой фазе. Данный процесс позволяет формировать композиции без существенных ограничений по составу и числу компонентов. В результате образуются модифицированные композиционные частицы порошка, имеющие новые фазы и химические соединения, которые при традиционных способах литья получить невозможно.

Исходя из вышесказанного, целью работы было увеличение микрохимической однородности сварных швов при дуговой сварке плавлением покрытыми электродами за счет применения модифицированных порошковых материалов.

Материалы, оборудование и методика исследований

Для проведения экспериментальной части исследований изготавливали электроды на основе стандартных электродов

марки МР-3 (ГОСТ 9466-75). В покрытие электродов дополнительно вводили порошки железа (ГОСТ 9849-86) и ферросплавов: феррокремний ФС75 (ГОСТ 1415-93), ферромарганец ФМн88А (ГОСТ 4755-91), феррохром ФХ850 (ГОСТ 4757-91). Размеры частиц всех исходных порошков находились в диапазоне от 63 до 160 мкм. Соотношения исходных компонентов в шихте составляли: FeCr – 5 %; FeMn – 0,9 %; FeSi – 1,5 %; Fe – 91,7 %.

Для определения влияния модифицированных композиционных материалов на свойства сварного шва изготовили две партии электродов. В первую партию к стандартному электродному покрытию добавили 15,8 и 27,4 % порошка без какой-либо обработки; во вторую партию – порошки, подвергнутые механическому легированию [1, 5–8] в том же процентном отношении.

Перед добавлением в шихту обмазки электродов первой партии порошки подвергали смешиванию в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 2 ч, размеры частиц порошков после смешения не изменялись.

Получение композиционного порошка второй партии осуществляли в механореакторе гирационного типа [1, 5] с объемом помольной камеры 1 дм³. В качестве размалывающих тел использовали стальные шары с твердостью поверхности 62 HRC. Размеры гранул после обработки находились в интервале от 10 до 90 мкм.

Электроды изготавливали методом прессования в металлических полуформах. Данный выбор обусловлен тем, что для первоначальных научных исследований, где необходима оперативность в проведении экспериментальной части, требуется небольшое количество разных по химическому составу электродов. Использовать оборудование и технологии массового производства в данном случае нецелесообразно. Изготовленные полуформы обеспечивали за-

крепление и центровку металлического стержня, а также равномерное распределение необходимого объема обмазочной массы по длине электрода с целью дальнейшего её обжарки. Покрытие электрода формировалось требуемого диаметра без эксцентриситета.

В процессе сварки полученными

электродами на токах 70...110 А после их естественной сушки при 18...25 °С в течение 24 ч дуга горела неустойчиво, с крупнокапельным переносом электродного металла и чрезмерным разбрызгиванием. Покрытие на оплавленном конце электрода вспучивалось или частично отделялось от стержня (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид оплавленной части сварочного электрода

Получить стабильное горение дуги и качественное формирование сварного шва не удавалось. Прокалка сварочных электродов при 160...180 °С в течение 1,5 ч позволила полностью устранить данные недостатки. Размеры сварных швов стали соответствовать требованиям ГОСТ 5264-80.

Влияние модифицированных порошковых материалов на механические свойства наплавленного металла определяли на образцах, выполненных при помощи дуговой наплавки на специализированной установке и ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

При реализации варианта наплавки равномерность объема наплавленного металла по длине шва особенно важна при рассмотрении влияния легирующих элементов на механические свойства металла. В этом случае небольшие от-

личия по ширине или высоте выпуклости наплавленного слоя могут привести к неоднородности химического состава. Добиться постоянства данных параметров при ручном способе наплавки сложно или невозможно. Колебания руки сварщика могут повлечь за собой отклонение ширины шва до 1 мм, а в отдельных случаях и более. Неравномерность скорости движения электрода вдоль оси шва приводит к таким же последствиям.

С целью минимизации изменения габаритных размеров сварного шва по его длине применили наплавку штучными наклонными электродами [9–12] на специально разработанной установке, состоящей из электрододержателя, каретки и стойки (схема представлена на рис. 2).

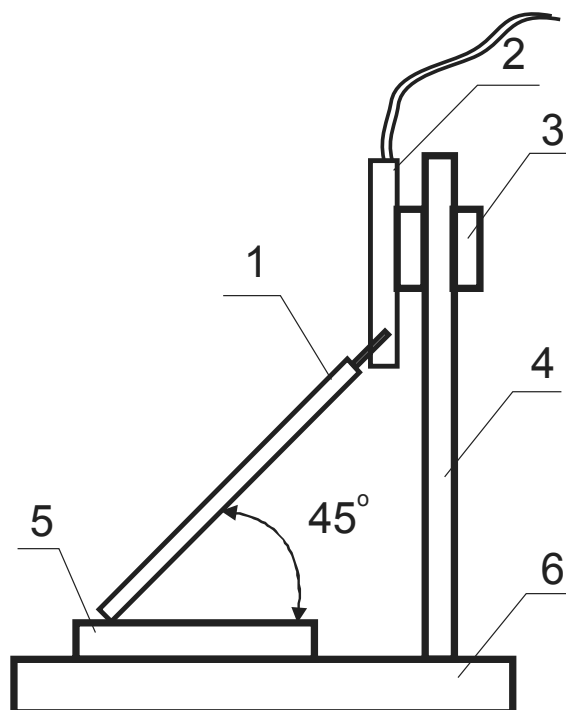


Рис. 1. Схема сварки наклонным электродом: 1 – электрод; 2 – электрододержатель; 3 – каретка; 4 – стойка; 5 – изделие; 6 – основание

Одностороннюю наплавку производили по принципу падающего электрода с углом наклона электрода к изделию 45° , зажав держак на подвижной каретке, которая обеспечивала его вертикальное перемещение. Стойку крепили неподвижно к основанию, на котором располагалось изделие. Такой подход позволил автоматизировать процесс наплавки и обеспечил постоянную скорость плавления и перемещения электрода вдоль оси шва по мере его плавления. Формирование наплавленного слоя происходило с постоянными геометрическими размерами валика на всей его протяженности.

Для определения влияния модифицирующих добавок на механические свойства закристаллизовавшегося металла наплавку образцов осуществляли на пластины из стали 09Г2С размером 100×150 мм и толщиной 5 мм на следующих режимах: сила сварочного тока $I_{св} = 75 \dots 85$ А, скорость сварки $V_{св} = 12 \dots 13$ м/ч, диаметр электрода

$d_e = 3$ мм. В процессе горения дуги козырек покрытия электрода опирался на изделие, что обеспечивало постоянную длину дуги. В качестве источника питания использовали источник питания Minarc-220.

На поверхности наплавленного слоя всех полученных образцов измеряли твердости по методу Бринелля твердомером ТБ 5004 с диаметром металлического шарика 5 мм и усилием нагрузки 7355 Н.

Для проведения металлографических исследований использовали сканирующий микроскоп TESCAN-LSH с приставкой для энергодисперсионного микроанализа INCA-ENERGY и оптический микроскоп Metam PB-21.

Контрольные образцы для испытаний на растяжение выполняли ручной дуговой сваркой покрытыми электродами традиционным способом без применения специально разработанной установки. Сваривали две пластины между собой (угол скоса кромок $\beta = 25^\circ$) на

следующих режимах: сила сварочного тока $I_{св} = 75...85$ А, скорость сварки $V_{св} = 8...9$ м/ч, длина дуги $l_d = 3...4$ мм. Сварной шов формировался за два прохода: первый шов обеспечивал заварку корня шва, второй – заполнение разделки кромок. Размеры полученных сварных швов соответствовали требованиям ГОСТ 5264-80. Из каждого сварного соединения вырезали по три контрольных образца. Испытания сварного соединения на статическое растяжение осуществляли по ГОСТ 6996-66 на разрывной машине МУП-50.

Результаты исследований и их обсуждение

При добавлении в стандартное покрытие электродов марки МР-3 порошка в количестве 15 и 27,3 %, не подверг-

нутого модифицированию, в обоих случаях (образцы 1 и 2) среднее значение твердости на поверхности наплавленного шва составило 167 и 168 НВ соответственно. Результаты измерений представлены в табл. 1.

С добавлением модифицированных порошков в тех же процентных отношениях (образцы 3 и 4) твердость составила в среднем 180 и 184 НВ, а ее увеличение – 8...10 %. Такой эффект связан с использованием модифицированного порошка, что вызвало изменение процессов кристаллизации и структуры наплавленного металла.

Применение модифицирующих добавок оказало воздействие на размеры наплавленного шва и зоны термического влияния.

Табл. 1. Размеры зоны термического влияния (ЗТВ), сварных швов и их твердость

Номер образца	Количество модифицирующего порошка, %	Ширина шва, мм	Глубина проплавления, мм	Ширина ЗТВ, мм, лицевая	Высота выпуклости, мм	Ширина ЗТВ, мм, обратная	Твердость шва, НВ
1	15	7,8	1,2	10,8	2,0	7,1	165...169
2	27,4	7,6	1,2	11,3	2,0	6,8	166...170
3	15	7,6	1,3	13,5	1,5	11,6	178...182
4	27,4	7,1	1,3	11,6	1,7	8,5	181...187

В швах, выполненных электродами второй партии с добавлением 15 и 27,4 % порошка, глубина проплавления сварного шва увеличилась на 0,1 мм. Ширина шва и высота выпуклости уменьшились на 0,2...0,4 и 0,3...0,5 мм соответственно. В результате произошло уменьшение объема наплавленного металла с одновременным увеличением глубины проплавления. Такие изменения размеров были вызваны возрастанием тепловыделения в системе дуга-ванна жидкого металла.

Дополнительное выделение тепла связано с изменением металлургических процессов плавления модифицированных порошковых материалов и процес-

сов кристаллизации сварочной ванны. Предположительно, увеличение глубины проплавления произошло за счет протекания экзотермических реакций в объеме расплавленного металла. Такой эффект связан с тем, что в процессе модификации частицы порошка подвергаются значительному пластическому деформированию, приводящему к созданию напряженного состояния в них. В результате внутри композиционных частиц образуется запас энергии, который высвобождается при расплавлении порошка в сварочной ванне. Следовательно, возникает дополнительная теплота, изменяющая параметры наплавленного шва. Подтверждением данной

теории может служить увеличение зоны термического влияния с лицевой стороны шва на 1,5...2,5 мм, с обратной – на 1,5...4,5 мм.

С целью выявления изменений процесса кристаллизации наплавленные швы подвергали металлографическому анализу. В связи с тем, что максимальные отличия в размерах полученных швов и их твердости наблюдались при добавлении в покрытие электродов 27,4 % порошковых материалов, металлографические исследования проводили

на данных образцах. Анализ микроструктуры показал, что применение модифицированных порошковых материалов позволило образовать четко выраженные границы кристаллов (рис. 2).

При рассмотрении тела зерна можно отметить, что в образцах, выполненных с применением первого варианта электродов, направленность кристаллизации происходит от границ к центру (рис. 3, а) с появлением в центральной части внутризеренной микрохимической неоднородности.

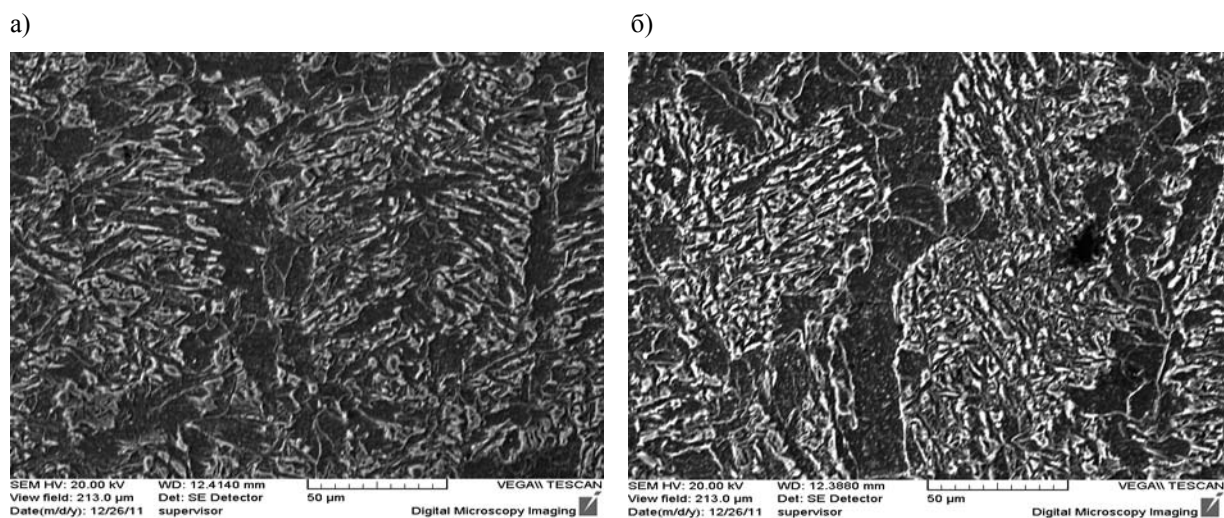


Рис. 2. Микроструктура наплавленных швов, $\times 1000$: а – выполненных с применением порошковых материалов, не подвергнутых модифицированию; б – выполненных с применением порошковых материалов, подвергнутых модифицированию

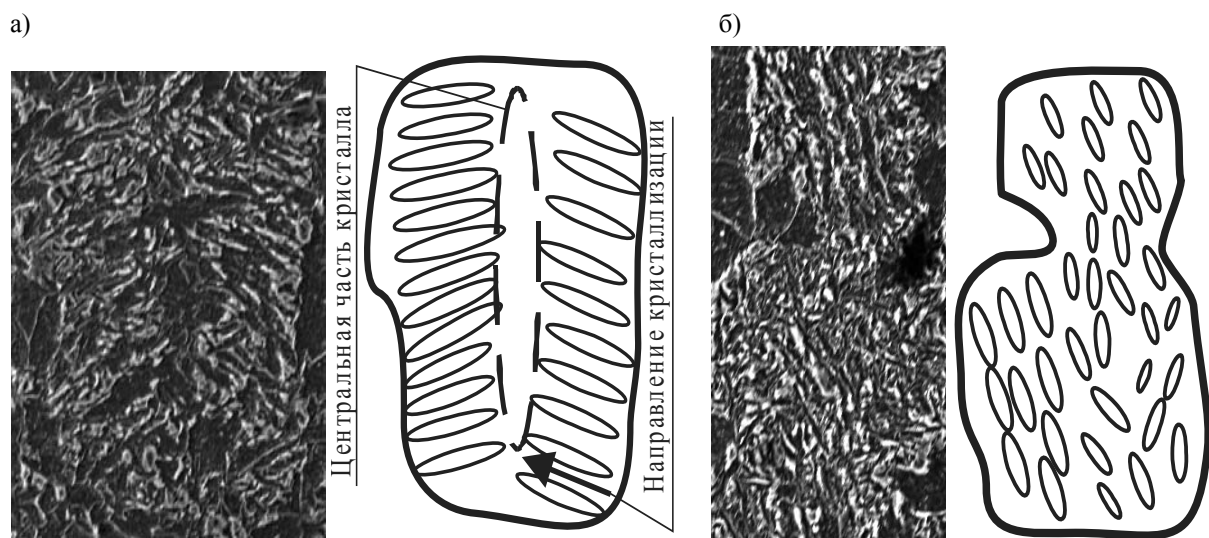


Рис. 3. Микроструктура зерен

В образцах, выполненных с применением второго варианта электродов, таких участков не наблюдается (рис. 3, б). В них имеется однородная структура по всей площади зерна.

Определение влияния модифицированных материалов на прочностные характеристики сварного соединения производилось на образцах, полученных дуговой сваркой двух пластин. Изменение прочностных свойств швов, сваренных электродами с 15-процентным добавлением порошка как без модифицирования, так и с модифицированием, не выявлено. Предположительно, это связано с небольшим количеством легирующих элементов, которые не смогли оказать воздействие на структурные изменения в процессе кристаллизации шва.

Добавление 27,4 % порошка в покрытие электродов позволило обозначить отличия в прочностных характеристиках. В сварных соединениях, выполненных электродами первой партии, среднее временное сопротивление на разрыв составило 580 МПа. Применение электродов второй партии повысило временное сопротивление на разрыв до 632 МПа. Прочность металла увеличилась на 7...11 %, что говорит о положи-

тельном влиянии механически легированных порошковых материалов на механические свойства сварного соединения. Такой эффект наблюдается в результате уменьшения размеров и количества мелких составляющих на линии срастания кристаллов, что повышает межкристаллитную микрохимическую однородность данного участка. Кроме этого, влияние оказала более плотная и однородная структура зерен закристаллизовавшегося металла.

Выводы

Применение модифицированных порошковых материалов при изготовлении покрытых электродов позволило снизить неоднородность структуры по границам и в теле зерна сварных швов.

Снижение степени микрохимической неоднородности повысило механические свойства сварного соединения, твердость на 8...10 % и временное сопротивление на разрыв на 7...11 % за счет уменьшения неоднородности наплавленного металла.

Результаты исследований позволяют говорить о появлении нового направления в повышении качества сварного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А. В. Коновалов [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
3. **Фудзивара, М.** Тенденции в разработке дисперсно-упрочненных оксидами сплавов на основе Fe / М. Фудзивара // *Metals and Technol.* – 1992. – Vol. 62, № 5. – С. 16–20.
4. **Кузнецов, М. А.** Нанотехнологии и наноматериалы в сварочном производстве / М. А. Кузнецов, Е. А. Зернин // *Сварочное производство.* – 2010. – № 12. – С. 23–26.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Теоретические и технологические основы создания порошковых механически легированных алюминиевых и медных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06 / Ф. Г. Ловшенко. – Минск, 1998. – 44 с.
6. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : БНТУ, 2012. – 279 с.
7. Применение композиционных механически легированных порошковых материалов при дуговой наплавке / Д. И. Якубович [и др.] // *Вестн. Брян. гос. техн. ун-та.* – 2012. – № 4. – С. 50–53.
8. **Якубович, Д. И.** Применение мелкодисперсных порошковых материалов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами / Д. И. Якубович // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, апрель.* – Могилев, 2013. – С. 189–190.

9. **Банов, М. Д.** Сварка и резка материалов : учеб. пособие / М. Д. Банов, Ю. В. Казаков, М. Г. Козулин ; под ред. Ю. В. Казакова. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2002. – 400 с.
10. **Чернышов, Г. Г.** Справочник электрогазосварщика и газорезчика : учеб. пособие / Г. Г. Чернышов. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 400 с.
11. **Акулов, А. И.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки : учебник для вузов / А. И. Акулов. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 2003. – 560 с.
12. **Хренов, К. К.** Сварка, резка и пайка металлов / К. К. Хренов. – 4-е изд., стер. – М. : Машиностроение, 1973. – 408 с.

Статья сдана в редакцию 17 марта 2015 года

Дмитрий Иванович Якубович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: D.I.Yakubovich@mail.ru.

Ирина Александровна Лисовая, канд. биол. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: lisovaya-irina@list.ru.

Ирина Михайловна Лужанская, канд. хим. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: irina_luzhanskay@mail.ru.

Dmitry Ivanovich Yakubovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: D.I.Yakubovich@mail.ru.

Irina Aleksandrovna Lisovaya, PhD (Biology), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: lisovaya-irina@list.ru.

Irina Mikhailovna Luzhanskaya, PhD (Chemistry), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: irina_luzhanskay@mail.ru.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83

В. Т. Вишнеревский, И. С. Стасенко, Г. С. Леневский, А. В. Лекарева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЕ

UDC 62-83

V. T. Vishnerevsky, I. S. Stasenko, G. S. Lenevsky, A. V. Lekareva

SIMULATION OF ELECTRIC DRIVES CONTAINING A LINEAR ELEMENT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN THE MECHANICAL SUBSYSTEM

Аннотация

Рассматриваются вопросы математического и натурного моделирования электроприводов, содержащих линейный элемент с распределенными параметрами. Для синтеза более совершенных систем управления электроприводом с распределенными параметрами разработана математическая модель, учитывающая колебательные свойства механической части и ее влияние на электрическую часть системы, позволяющая моделировать в среде Matlab электромеханические системы с учетом любого количества резонансных частот в механической подсистеме. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова:

электропривод, распределенные параметры, моделирование.

Abstract

Mathematical and full-scale modeling of electric drives containing a linear element with distributed parameters is considered. For the synthesis of more sophisticated systems to control the electric drive with distributed parameters, the mathematical model has been developed that takes into account vibrational properties of the mechanical part, as well as its effect on the electrical part of the system and allows modeling electromechanical systems in the Matlab environment, taking into consideration any number of resonant frequencies in the mechanical subsystem. The adequacy of the model is confirmed by experimental studies.

Key words:

electric drive, distributed parameters, simulation.

Механическая подсистема электропривода с распределенными параметрами является сложным объектом с точки зрения теории автоматического управления. Для данного объекта характерны явно выраженные колебательные свойства наряду с запаздыванием распространения прикладываемого воздействия. Особенность систем электропри-

вода с распределенными параметрами – отсутствие возможности составления их адекватной математической модели с помощью широко распространенных расчетных схем электропривода с двумя либо тремя массами. Разбиение протяженных упругих элементов на большое количество сосредоточенных масс приводит к неоправданному усложнению

их математического описания. В представленной работе рассматриваются линейные элементы с распределенными параметрами, которые можно выделить в механической части электроприводов шахтных грузоподъемных установок. При синтезе систем управления электроприводами таких установок приходится решать задачу устранения возникающих при пуске колебаний с достижением максимального быстродействия установки. Возникающие колебания являются опасными для оборудования и обслуживающего персонала, поскольку приводят к преждевременному износу тросов и могут стать причиной возникновения аварийных ситуаций и выхода оборудования из строя [1]. Существующие способы формирования процесса пуска указанных установок, основанные на плавном повышении задающего воздействия, в настоящее время следует признать устаревшими. В связи с развитием микропроцессорных средств стало возможным применение более совершенных систем управления, синтез которых подразумевает наличие математической модели, адекватной объекту управления в достаточной для проведения компьютерного моделирования степени.

Математическое описание элементов систем с распределенными параметрами (бесконечномерных систем, систем с бесконечным числом масс) [2] подразумевает использование систем уравнений в частных производных. На основании ранее проведенных исследований, направленных на выбор подходящего способа аппроксимации бесконечномерных выражений передаточных функций, которые описывают поведение различных элементов с распределенными параметрами, был выбран способ, заключающийся в разложении исходной передаточной функции на простейшие дроби. Также были проведены исследования, подтвердившие достаточно высокую точность аппроксимации, выполненной данным способом [3].

Таким образом, благодаря наличию

указанного математического описания создается возможность учитывать любое количество резонансных частот объекта управления. Поскольку рабочий диапазон электроприводов, как правило, лежит в диапазоне до 10 Гц [2], в [3] были даны рекомендации по выбору числа учитываемых резонансных частот.

Для того чтобы проводить полноценный анализ системы электропривода, в том числе оценку влияния механической подсистемы на электрическую, необходимо располагать структурой математической модели, в которой присутствует четкое разделение на электрическую и механическую части. Так как в электроприводе шахтных грузоподъемных установок традиционно используются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением [2], то целесообразно применять линеаризованную модель двигателя, входной величиной для которой является напряжение якорной цепи, а выходной – электромагнитный момент [4]. В такой модели учитывается обратная связь по противо-ЭДС двигателя, которая зависит от скорости вращения его вала. В качестве механической подсистемы в данном случае может служить одно-, двух- или трехмассовая расчетная схема [5]. Входной величиной для всех расчетных схем является момент на валу двигателя, а выходной величиной – угловая скорость вращения. Угловая скорость первой массы каждой из расчетных схем используется для реализации обратной связи по противо-ЭДС приводного двигателя.

В свою очередь, передаточные функции элементов с распределенными параметрами могут быть сведены к одномассовой расчетной схеме путем предельного перехода при значении жесткости, стремящемся к бесконечности. На основании изложенного можно сделать вывод, что аппроксимированные передаточные функции линейного эле-

мента с распределенными параметрами [3] могут быть пригодны для совместного использования с моделью двигателя постоянного тока только после коэффициента преобразования входных и выходных величин.

Поскольку при выводе передаточной функции [2] производится переход к безразмерным величинам, то для получения входного воздействия для подсистемы линейного элемента с распределенными параметрами значение электромагнитного момента должно быть преобразовано путем умножения последнего на передаточное число редуктора и деления на радиус приводного барабана, суммарную массу упругого элемента и квадрат скорости распространения волны упругой продольной деформации. Очевидно, что значение линейной скорости для перехода к угловой необходимо умножить на значение скорости распространения волны и передаточное число редуктора, а это произведение разделить на радиус приводного барабана.

На основании системы дифференциальных уравнений, представленной в [6], с учетом использования аппроксимированной передаточной функции от усилия к скорости линейного элемента с распределенными параметрами можно получить структурную схему математической модели исследуемой электромеханической системы (рис. 1).

На представленной структурной схеме (см. рис. 1) приняты следующие обозначения: $W_{\text{тп}}$ – передаточная функция транзисторного преобразователя; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи приводного электродвигателя постоянного тока; $T_{\text{я}}$ – электрическая постоянная времени приводного электродвигателя; $C_{\text{м}}$ – конструктивный коэффициент двигателя постоянного тока; i – передаточное число редуктора; R – радиус приводного шкива; l – длина распре-

ленно-упругого элемента; m_{Σ} – суммарная приведенная масса линейного элемента с распределенными параметрами; a – скорость распространения волны упругой продольной деформации по упругому элементу; $W_{\text{пп0}}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в точке крепления первой массы; $W_{\text{пп1}}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в точке крепления второй массы; $W_{\text{ппS}}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в сечении S указанного элемента.

Кроме того, представлены изображения по Лапласу следующих величин: $U_3(p)$ – сигнал задания для транзисторного преобразователя; $U_{\text{тп}}(p)$ – выходное напряжение транзисторного преобразователя; $E(p)$ – противо-ЭДС двигателя постоянного тока; $I_{\text{я}}(p)$ – ток якоря двигателя постоянного тока; $M_{\text{д}}(p)$ – момент на валу приводного двигателя; $F(p)$ – усилие, прикладываемое к распределенно-упругому элементу; $\varphi(p)$ – нормированное входное усилие для передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами; $V_0(p)$, $V_s(p)$, $V_1(p)$ – нормированные значения скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно; $v_0(p)$, $v_s(p)$, $v_1(p)$ – значения линейной скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно; $\omega_0(p)$, $\omega_s(p)$, $\omega_1(p)$ – значения угловой скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно.

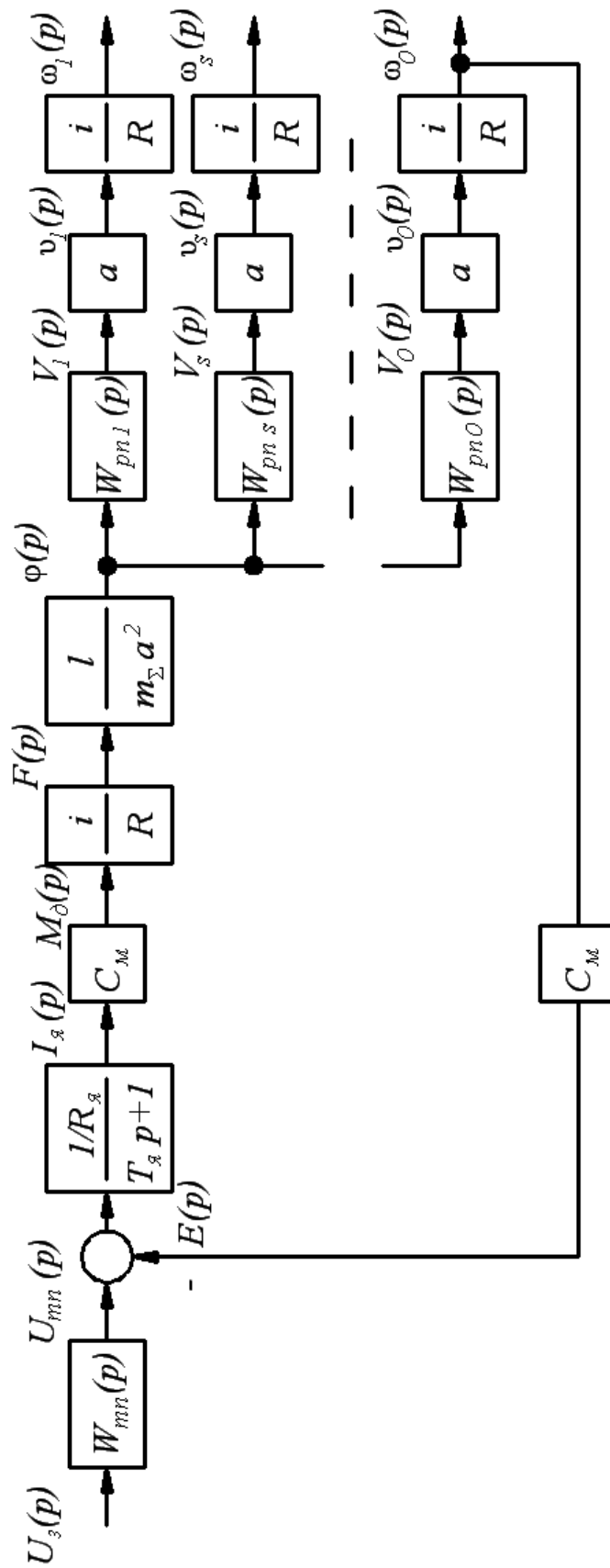


Рис. 1. Структурная схема модели электромеханической системы с распределенными параметрами

При нормировании величин применяются следующие соотношения [7]:

$$\varphi(p) = F / F_{\Sigma}; \quad (1)$$

$$F_{\Sigma} = \frac{m_{\Sigma} \cdot a^2}{l}; \quad (2)$$

$$V = v / a. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, для осуществления обратной связи по противо-ЭДС двигателя используется выходное значение передаточной функции в точке крепления первой массы. Считается, что первая масса жестко соединена с валом приводного двигателя. Передаточные функции $W_{ПП1}$, $W_{ПП5}$ применяются для вычисления мгновенных значений скорости в различных сечениях распределенно-упругого элемента. Данные значения могут быть использованы напрямую или после дифференцирования в качестве сигналов обратных связей для системы автоматического управления. Возможность получения при моделировании мгновенного значения скорости или ускорения делает представленную модель пригодной для синтеза и исследования наблюдателей состояния в системах управления электроприводами шахтных грузоподъемных установок.

Следует отметить, что представленная на рис. 1 структурная схема предназначена для моделирования процесса пуска статически уравновешенной подъемной установки [7]. При синтезе систем управления электроприводами с распределенными параметрами в данной работе рассматриваются только динамические нагрузки, величина которых значительно превышает величину статических нагрузок, вызванных силами трения в механизмах. При проведении моделирования переходные процессы рассматриваются до момента выхода на установившееся значение. Считается, что время переходного процесса пуска мало по сравнению со временем цикла подъема. Поэтому длина подъемных

тросов и масса поднимаемого груза остаются неизменными за время пуска установки.

Важной особенностью представленной структурной схемы является возможность измерения мгновенных значений величин скорости и ускорения в любой точке элемента с распределенными параметрами, что в будущем позволит исследовать системы управления с дополнительными обратными связями.

Все параметры представленной модели можно получить расчетным путем, кроме скорости распространения волны упругой продольной деформации – значение этой величины в лабораторных условиях было определено следующим образом: к приводному двигателю было приложено импульсное входное воздействие, после чего было измерено время отклика массы, закрепленной на противоположном конце элемента с распределенными параметрами.

Для математического моделирования исследуемой электромеханической системы были использованы значения параметров специализированной лабораторной установки, разработанной на кафедре «Электропривод и АПУ» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», предназначенной для экспериментального получения частотных характеристик электромеханической системы с распределенными параметрами, а также для исследования переходных процессов в такой системе. При работе лабораторной установки моделируется процесс пуска шахтной грузоподъемной установки. Параметры пружины, используемой в качестве элемента с распределенными параметрами, подобраны таким образом, что в диапазоне входных воздействий до 10 Гц присутствуют четыре резонансные частоты.

Проведение экспериментальных исследований подразумевает получение частотных характеристик в диапазоне до 10 Гц, в качестве приводного двигателя выбран малоинерционный двигатель постоянного тока ПЯ250Ф. В качестве си-

лового преобразователя используется широтно-импульсный преобразователь. Его несущая частота составляет 7800 Гц, поэтому передаточная функция преобразователя при проведении математического моделирования представлена пропорциональным звеном.

Для проведения компьютерного моделирования вычислены параметры аппроксимированной модели линейного элемента с распределенными параметрами. В соответствии с выражением передаточной функции [3], с учетом коэффициентов диссипации колебаний, которые были определены экспериментальным путем [8], получена подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами. Значения полюсов и вычетов передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами от усилия к скорости в точке подвеса поднимаемого груза сведены в табл. 1.

На рис. 2 представлен процесс ре-

акции на импульсное входное воздействие звена, которое характеризуется передаточной функцией элемента с распределенными параметрами. Представленный график получен с помощью математического пакета Mathcad.

На рис. 3 представлена модель электромеханической системы с распределенными параметрами в MatlabSimulink.

На рис. 4 представлена подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами в MatlabSimulink. При использовании предложенного способа аппроксимации передаточной функции коэффициенты диссипации колебаний учитываются путем прибавления к оператору Лапласа s значения коэффициента диссипации в каждом конкретном полюсе [3].

Графики переходных процессов силы тока якоря приводного двигателя и скорости поднимаемого груза представлены на рис. 5.

Табл. 1. Значения полюсов и вычетов передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами от усилия к скорости в точке подвеса поднимаемого груза

Значение полюса	Значение вычета	Значение полюса	Значение вычета
0,9118	-0,5639	12,5142	-0,0069
3,3765	0,0872	15,6104	0,0045
6,3628	-0,0262	18,7112	-0,0031
9,4273	0,0121	21,8149	0,0023

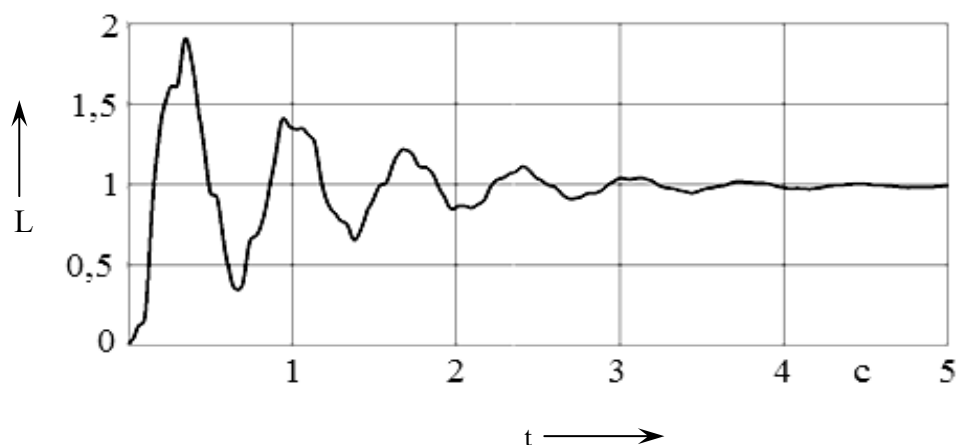


Рис. 2. График переходного процесса в результате реакции на импульсное воздействие

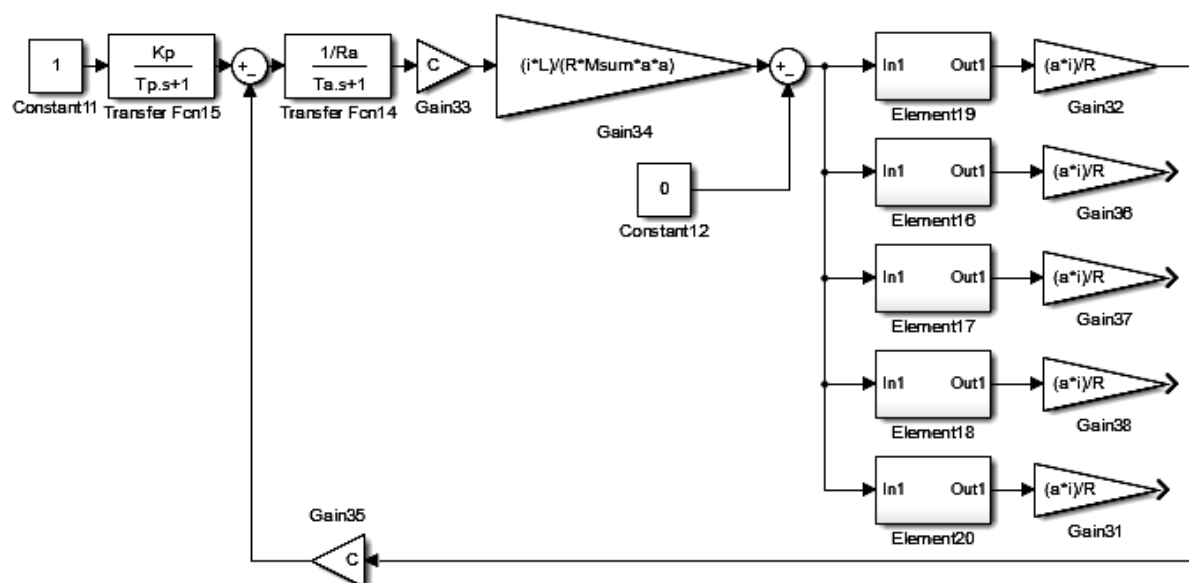


Рис. 3. Модель системы с распределенными параметрами

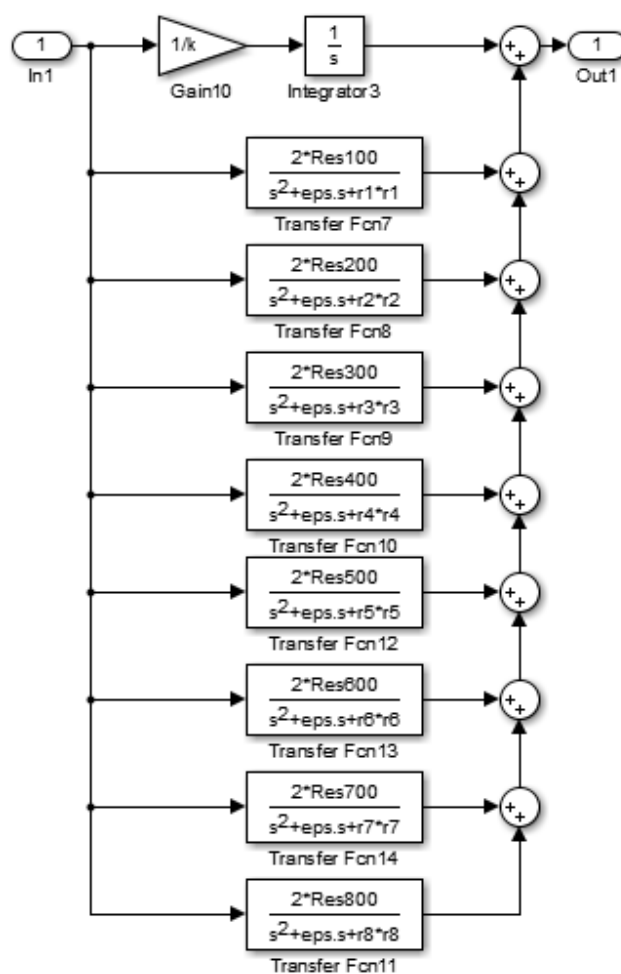


Рис. 4. Подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами в MatlabSimulink

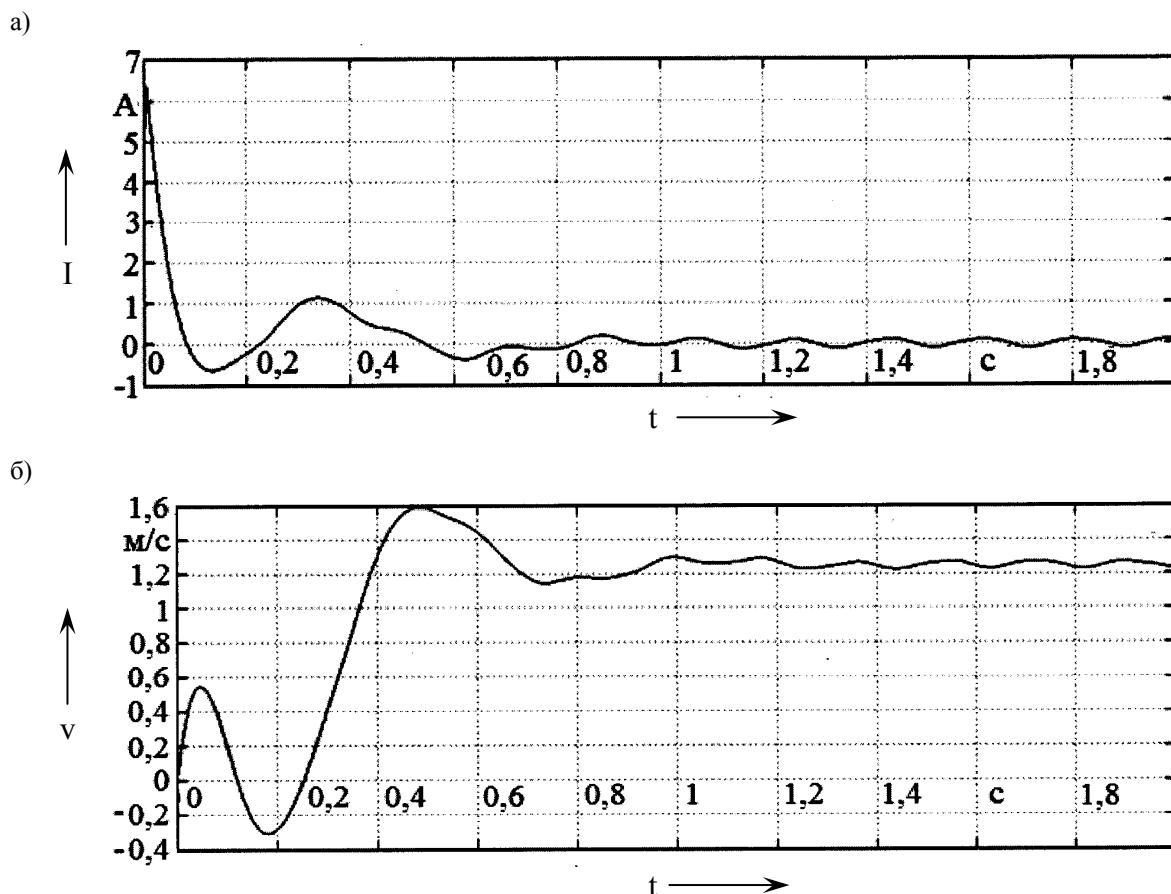


Рис. 5. Графики переходных процессов силы тока якоря приводного двигателя и скорости поднимаемого груза

Согласно графикам, представленным на рис. 5, в конце переходного процесса величина скорости находится около заданного значения, а величина тока – вблизи нулевого значения вследствие отсутствия статической нагрузки. Следовательно, можно сделать вывод о корректности работы математической модели.

Колебания величин тока и скорости происходят на частотах, которые соответствуют резонансным частотам входящего в состав установки элемента с распределенными параметрами.

Выводы

1. В настоящее время для моделирования и анализа систем электропривода с упругими связями широко используется математическое описание,

которое предусматривает разбиение механической подсистемы на определенное количество сосредоточенных масс, соединенных упругими звеньями. Однако в тех случаях, когда упругие элементы обладают большой длиной и массой, соизмеримой с массой исполнительного органа и перемещаемого груза, необходимым становится применение математических моделей с учетом распределенности параметров. Существующее математическое описание систем электропривода с распределенными параметрами не является практичным для использования в современных математических пакетах. Поэтому возникла необходимость создания более совершенной структуры математической модели, пригодной для проведения анализа и синтеза систем управления элект-

троприводами.

2. Предложенная авторами структурная схема может быть применена для проведения дальнейших исследований, направленных на разработку более совершенных способов построения систем управления электроприводами, в том числе с использованием наблюдателей состояния. С помощью представленной модели возможно получение графиков переходных процессов величин скорости и ускорения в любой точке линейного элемента с распределенными параметрами.

3. По результатам моделирования подтверждена корректность работы

математической модели. Установлено, что переходные процессы всех выходных величин завершаются выходом на установившееся значение. В результате реакции на ступенчатое воздействие возникают колебания, которые соответствуют резонансным частотам передаточной функции элемента с распределенными параметрами. Экспериментальные исследования по проверке адекватности будут производиться путем сопоставления частотных характеристик, полученных с помощью модели, и экспериментальным путем на лабораторной установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Католиков, В. Е.** Динамические режимы рудничного подъема / В. Е. Католиков, А. Д. Дикель. – М. : Недра, 1995. – 448 с. : ил.
2. **Рассудов, Л. Н.** Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
3. **Вишнеревский, В. Т.** Аппроксимация передаточных функций звеньев электромеханических систем с распределенными параметрами // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 57–61.
4. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
5. **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. : ил.
6. **Киселев, Н. В.** Электроприводы с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н. Мядзель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с. : ил.
7. **Степанов, А. Г.** Динамика шахтных подъемных установок / А. Г. Степанов. – Пермь : УрОРАН, 1994. – 203 с.
8. **Вишнеревский, В. Т.** Экспериментальное исследование частотных свойств механических элементов с распределенными параметрами / В. Т. Вишнеревский, И. С. Стасенко, Г. С. Ленецкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 23–32.

Статья сдана в редакцию 4 марта 2015 года

Владимир Тадеушевич Вишнеревский, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: Vishnerevsky@mail.ru.

Игорь Сергеевич Стасенко, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-44-714-39-66.

Геннадий Сергеевич Ленецкий, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-31-14-44.

Анастасия Владимировна Лекарева, аспирант, Владимирский государственный университет.

Vladimir Tadeushevich Vishnerevsky, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: Vishnerevsky@mail.ru.

Igor Sergeevich Stasenko, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-44-714-39-66.

Gennady Sergeevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-31-14-44.

Anastasiya Vladimirovna Lekareva, PhD student, Vladimir State University.

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, Н. С. Лагун***ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ РЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТОВ**

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, N. S. Lagun***TRANSFER FUNCTIONS OF THE MECHANICAL SUBSYSTEM OF THE ELEVATOR REDUCTION ELECTRIC DRIVE****Аннотация**

Для механических подсистем электропривода лифтов получены передаточные функции по основным регулируемым координатам. Показано, что при синтезе систем управления электроприводом лифтов возможно использование одномерной расчетной схемы без учета влияния упругих свойств канатов.

Ключевые слова:

лифт, упругие свойства канатов, переходные процессы в механической подсистеме лифта, передаточные функции.

Abstract

Transfer functions in principal adjustable coordinates have been obtained for the mechanical subsystem of the elevator electric drive. It is shown that in the synthesis of elevator electric drive control systems it is possible to use a one-mass block diagram with the effect of elastic properties of cables not being taken into account.

Key words:

elevator, the elastic properties of the ropes, the transients in the mechanical subsystem of the elevator, transfer functions.

Электропривод пассажирских и грузовых лифтов можно представить в виде электрической и механической подсистем [1]. Электрическая подсистема образована собственно двигателем и системой управления с силовым преобразователем. Механическая подсистема в зависимости от кинематической схемы крепления кабины лифта может иметь различное исполнение, но с достаточной точностью описывается консервативной трехмассовой расчетной схемой, уравнения движения которой имеют вид [2, 3]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} + M_2; \\ J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13} \cdot (\omega_3 - \omega_2), \end{cases} \quad (1)$$

где J_1, J_2, J_3 – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя, кабины лифта, противовеса соответственно,

кг·м²; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости двигателя, кабины лифты, противовеса соответственно, рад/с; M – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_{12}, M_{13} – приведенные к общему валу моменты взаимодействия, Н·м; C_{12}, C_{13} – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад.

Значения коэффициентов жесткости при растяжении определяются по формуле

$$C_j = \frac{n \cdot S \cdot E \cdot R^2}{L_j \cdot i^2}, \quad (2)$$

где C_j – коэффициенты жесткости при растяжении соответствующей ветви, Н/м; n – число канатов в ветви; S – поперечное сечение каната, м²; E – модуль упругости стального каната, МПа; R – радиус канатопроводящего шкива, м; i – передаточное число редуктора; L_j – длина соответствующей ветви каната.

Нормированная [4] структурная схема трехмассовой консервативной расчетной схемы приведена на рис. 1.

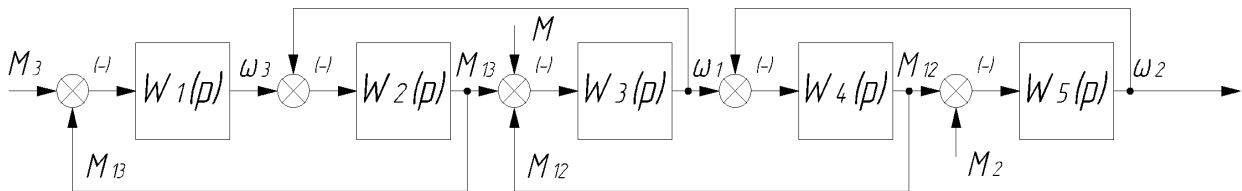


Рис. 1. Структурная схема нормированной трехмассовой консервативной системы: M – электромагнитный момент АД; M_{12}, M_{13} – приведенные к общему валу моменты взаимодействия; M_2, M_3 – приведенные к общему валу моменты, обусловленные силой тяжести; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости вращения двигателя, кабины лифта, противовеса

В данном случае

$$W_1(p) = \frac{1}{T_3 \cdot p}; \quad W_2(p) = \frac{1}{T_{пр} \cdot p};$$

$$W_3(p) = \frac{1}{T_M \cdot p}; \quad W_4(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p};$$

$$W_5(p) = \frac{1}{T_K \cdot p};$$

$$T_1 = \frac{B}{C_{12}}; \quad T_3 = \frac{B}{C_{13}}; \quad T_M = \frac{J_1}{B};$$

$$T_K = \frac{J_2}{B}; \quad T_{пр} = \frac{J_3}{B}.$$

Особенности многомассовых электромеханических систем более удобно можно выявить при использовании разветвленной структурной схемы, позволяющей наглядно оценить поведение каждой координаты [5]. Для трехмассовой расчетной схемы (см. рис. 1) разветвленная структурная схема имеет вид (рис. 2).

Передаточные функции $W_6(p), W_7(p), W_8(p)$ на разветвленной структурной схеме по каждой координате исходной схемы могут быть получены с помощью правила преобразования структурных схем Мейсона [4].

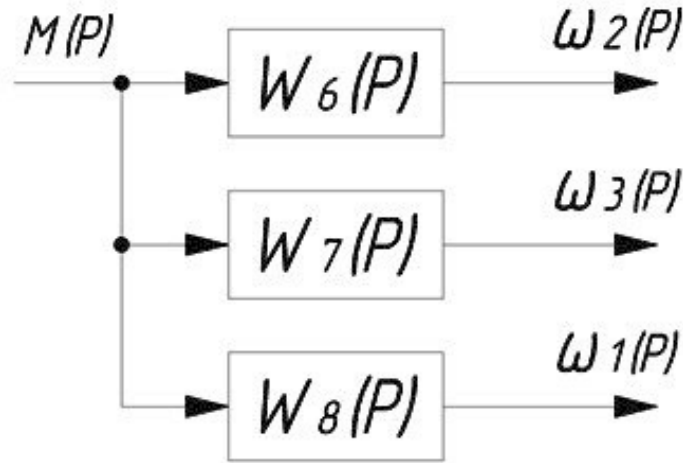


Рис. 2. Разветвленная структурная схема механической подсистемы редукторных лифтов ($M_2 = M_3 = 0$)

Передаточная функция $W_6(p)$ имеет вид:

$$W_6(p) = \frac{W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot (1 + W_1 \cdot W_2)}{1 + W_1 \cdot W_2 + W_3 \cdot W_4 + W_4 \cdot W_5 + W_1 \cdot W_2 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_4 \cdot W_5 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4}.$$

С учетом обозначений функция преобразуется:
 W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 эта передаточная

$$W_6(p) = \frac{T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot p^2 + 1}{p \cdot [T_3 \cdot T_1 \cdot T_K \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M \cdot p^2 + (T_1 \cdot T_M \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M) \cdot p^2 + T_K + T_M]}.$$

Аналогично могут быть получены передаточные функции по скорости перемещения груза $W_7(p)$ и по частоте вращения двигателя $W_8(p)$:

$$W_7(p) = \frac{T_1 \cdot T_K \cdot p^2 + 1}{p \cdot [T_3 \cdot T_1 \cdot T_K \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M \cdot p^2 + (T_1 \cdot T_M \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M) \cdot p^2 + T_K + T_M]};$$

$$W_8(p) = \frac{T_1 \cdot T_3 \cdot T_K \cdot T_{\text{пр}} \cdot p^4 + (T_{\text{пр}} \cdot T_3 + T_1 \cdot T_K) \cdot p^2 + 1}{p \cdot [T_3 \cdot T_1 \cdot T_K \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M \cdot p^2 + (T_1 \cdot T_M \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_K + T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_M) \cdot p^2 + T_K + T_M]}.$$

Постоянные времени, используемые в этих передаточных функциях для редукторного пассажирского лифта грузоподъемностью 400 кг и скоростью

движения 1 м/с (двигатель АЧ132-М6, передаточное число редуктора $i = 30$, количество стальных тросов ($d = 10,8$ мм) подвеса $n = 3$), приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения постоянных времени

$T_1, \text{с}$	$T_3, \text{с}$	$T_K, \text{с}$	$T_{\text{пр}}, \text{с}$	$T_M, \text{с}$
0,00036	0,000015	0,0044	0,0034	0,0025

При этих постоянных времени передаточные функции $W_6(p)$, $W_7(p)$,

$W_8(p)$ приобретают вид:

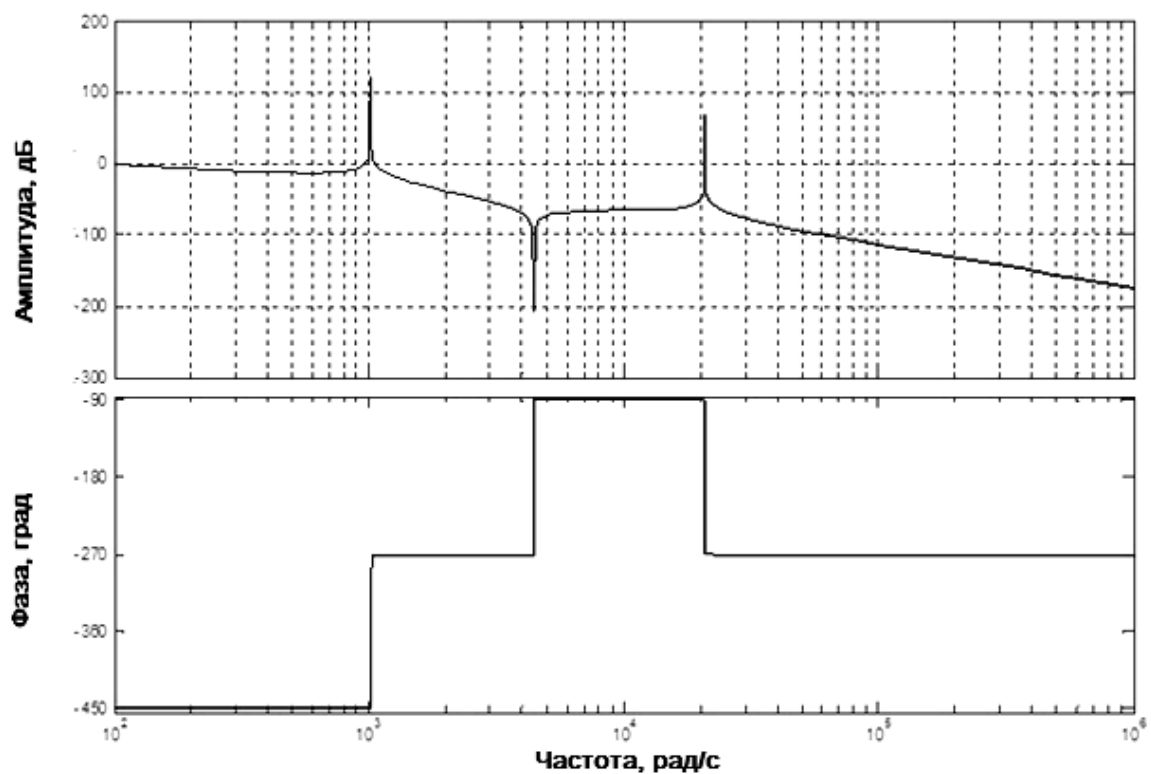
$$W_6(p) = \frac{2,104 \cdot 10^8 \cdot p^2 + 4,126 \cdot 10^{15}}{p^5 + 4,339 \cdot 10^7 \cdot p^3 + 4,45 \cdot 10^{13} \cdot p};$$

$$W_7(p) = \frac{5,05 \cdot 10^9 \cdot p^2 + 4,126 \cdot 10^{15}}{p^5 + 4,339 \cdot 10^7 \cdot p^3 + 4,45 \cdot 10^{13} \cdot p};$$

$$W_8(p) = \frac{3,32 \cdot 10^2 \cdot p^4 + 2,72 \cdot 10^8 \cdot p^2 + 4,126 \cdot 10^{15}}{p^5 + 4,339 \cdot 10^7 \cdot p^3 + 4,45 \cdot 10^{13} \cdot p}.$$

На рис. 3 показаны, например, соответствующие $W_6(p)$ ЛАЧХ и ЛФЧХ;

ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточных функций $W_7(p)$ и $W_8(p)$ подобны.

Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции $W_6(p)$

Упругие свойства канатов определяют частоты резонансов и антирезонансов $\omega_1, \omega_2, \omega_3$. Эти частоты резонансов могут быть рассчитаны аналитически по соответствующим нулям и полюсам $W_6(p)$.

До частоты первого резонанса, равной ω_1 , или первого антирезонанса (в зависимости от значений постоянных времени) ЛАЧХ механической подсистемы всех передаточных функций $W_6(p), W_7(p), W_8(p)$ обладают интегрирующими свойствами. Если учесть, что старшие коэффициенты в полиномах числителя и знаменателя передаточной функции $W_6(p)$, определяемые произведениями постоянных времени, имеют (для механических подсистем

электропривода лифтов) достаточно маленькие значения и ими можно пренебречь, то передаточные функции $W_6(p), W_7(p), W_8(p)$ приводятся к виду $W(p) = \frac{1}{(T_K + T_M) \cdot p}$, что соответствует

представлению механической подсистемы привода лифта в виде одномассовой расчетной схемы без учета упругих свойств канатов (при частоте среза проектируемой подсистемы меньше первых частот резонанса и антирезонанса).

Переходные процессы в механической подсистеме привода лифта с учетом упругих свойств канатов (например, передаточная функция $W_6(p)$) и без их учета показаны на рис. 4.

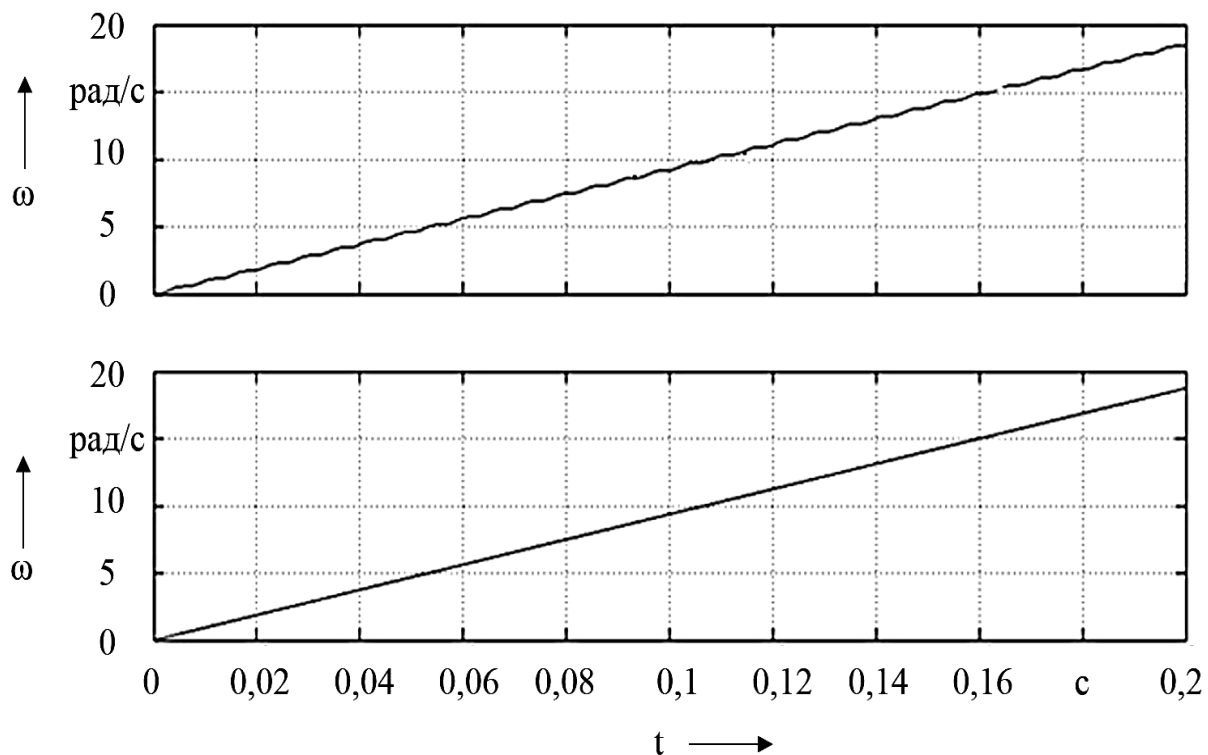


Рис. 4. Переходные процессы (приведенная к валу двигателя угловая скорость кабины лифта) в механической подсистеме лифта

Результаты имитационного моделирования показывают, что механическая подсистема привода лифта как с учетом упругих свойств, так и без учета

является звеном с интегрирующими свойствами. При этом процесс перемещения кабины лифта при учете упругих свойств имеет две составляющие:

1) вынужденную или медленную (действие масс противовеса, кабины и момента двигателя);

2) свободную или быструю (колебательную, обусловленную упругими связями).

Вынужденная составляющая определяет характер и скорость перемещения кабины лифта. Колебательная составляющая накладывается на вынужденную и определяет динамические нагрузки в механической подсистеме, но не изменяет характер вынужденной составляющей (при отсутствии электромеханической связи в системе привода; рассматриваемый случай). Возможность использования одномассовой модели как обеспечивающей адекватное отражение процессов в объеме, необходимом для анализа параметров системы привода лифта, отмечена в [6]. Известно [7], что искусственное обнуление старших коэффициентов характеристического полинома в замкнутых системах (использование одномассовой модели механической подсистемы при синтезе системы привода лифта) может приводить к нарушению устойчивости системы при малых изменениях ее параметров (нарушение грубости второго рода). В передаточных функциях $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ все коэффициенты определяются, кроме того, постоянными

времени T_1 , T_3 , T_k , которые изменяются при изменении высоты подъема кабины и загрузки в ней. Поэтому использование одномассовой модели механической подсистемы при синтезе регуляторов системы привода требует проверки получаемого характеристического полинома замкнутой системы на робастную устойчивость [7].

Выводы

1. На основе трехмассовой расчетной схемы, описывающей механическую подсистему привода лифтов, получены передаточные функции по скорости кабины лифта, скорости противовеса, частоте вращения двигателя. Эти передаточные функции определяют вынужденную и свободную составляющие скорости перемещения кабины лифта и могут быть использованы при синтезе системы регулирования привода лифта, например, полиномиальными методами.

2. При анализе параметров системы электропривода лифтов, а также при синтезе регуляторов привода возможно использование одномассовой модели механической подсистемы привода лифта с последующей проверкой синтезированной замкнутой системы на устойчивость (нарушение грубости второго порядка).

СПИСОК 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. Чупрасов, В. В. Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / В. В. Чупрасов ; Моск. энергет. ин-т. – М., 1976. – 19 с.
3. Структуры систем управления автоматизированным электроприводом / О. П. Ильин [и др.] ; под ред. А. Л. Галкина. – 2-е изд. – Минск : Наука и техника, 1978. – 368 с.
4. Борцов, Ю. А. Тиристорные системы ЭП с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергия, 1979. – 159 с.
5. Переслегин, Н. Г. Синтез систем управления электроприводами многомассовых механизмов с упругими связями. Автоматизированный электропривод / Н. Г. Переслегин ; под ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

6. **Кругликов, О. В.** Определение выходных данных для проектирования асинхронных электродвигателей безредукторных лифтовых лебедок / О. В. Кругликов // *Электротехника*. – 2012. – № 8. – С. 9–14.

7. Использование метода полиномиальных управлений для синтеза систем управления асинхронными электроприводами / З. Ш. Ишматов [и др.] // *Электротехника*. – 2004. – № 9. – С. 29–33.

Статья сдана в редакцию 9 февраля 2015 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: etf@bru.by.

Никита Станиславович Лагун, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: etf@bru.by.

Nikita Stanislavovich Lagun, MSc student, Belarusian-Russian University.

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012:624.046

В. В. Гичко

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ГИБКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК ДЕФОРМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

UDC 624.012:624.046

V. V. Gichko

CALCULATION OF FLEXIBLE REINFORCED-CONCRETE POLES STABILITY BY THE DEFORMATION METHOD

Аннотация

Приведены цель, задачи экспериментально-теоретических исследований и пути их решения по расчету устойчивости гибких железобетонных внецентренно сжатых элементов деформационным методом. Представлены количественная и качественная оценки на основе сопоставления данных экспериментальных исследований гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек при кратковременном действии нагрузки с результатами их расчета согласно разработанным методикам.

Ключевые слова:

устойчивость, несущая способность, деформационный метод, «точная» методика, упрощенный метод расчета, оценка точности.

Abstract

The purposes, tasks of theoretical and experimental research and ways for their solution by the calculation of stability of flexible eccentrically compressed reinforced concrete elements with the application of the deformation method are presented. The paper gives the quantitative and qualitative assessment based on comparing the data of experimental research of flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles under momentary load, which is performed by the author of the paper and earlier by other researchers, with the results of their calculation by using the methods developed.

Key words:

stability, load-bearing capacity, deformation method, «exact» method, simplified calculation method, accuracy assessment.

Введение

Современный рынок строительства при проектировании железобетонных конструкций требует обоснованной минимизации расхода строительных материалов. Одним из путей решения данной задачи является применение высокопрочных бетонов, в частности,

уменьшаются размеры поперечного сечения несущих конструкций и, соответственно, их вес. Однако уменьшение сечения несущих элементов приводит к увеличению их гибкости. Это требует от проектировщика умения учитывать в расчетах особенности работы таких элементов.

© Гичко В. В., 2015

Однако действующие нормы на сегодняшний день [1] не содержат четких рекомендаций к расчету гибких сжатых элементов с учетом влияния прогиба на их устойчивость.

Основная часть

Целью исследований являлась разработка методики расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке деформационным методом. Были сформулированы следующие задачи:

1) получить аналитические зависимости для определения прогибов гибких внецентренно сжатых элементов с учетом изменения жесткости по их длине, обусловленные физической нелинейностью задачи;

2) разработать методику расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке и выполнить оценку ее точности и надежности;

3) разработать упрощенную методику определения несущей способности внецентренно сжатых гибких железобетонных элементов, основанную на оценке прочности наиболее напряженного сечения с учетом продольного изгиба;

4) выполнить экспериментальные исследования поведения гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов в зависимости от величины эксцентриситета приложения нагрузки.

Решение первой задачи обусловило необходимость получения уравнения состояния для гибкого железобетонного элемента, в котором учитывалось бы изменение жесткости по его длине.

Эта задача была решена с помощью сплайн-функций – было получено в общем виде уравнение состояния для гибкого внецентренно сжатого железобетонного элемента с произвольным закреплением на концах:

$$f_i = \alpha(f_1 + l_0/n \varphi_1(i-1) + l_0^2/n^2 \times \\ \times [(3i-4)M_1/6B_1 + M_i/6B_i + \\ + \sum_{j=2}^i (i-j)M_j/B_i]), \quad (1)$$

где f_i – прогиб в i -м сечении элемента; f_1, φ_1 – начальные параметры (прогиб и угол поворота опорного сечения соответственно); l_0 – расчетная длина элемента; n – количество участков разбиения; M_1, M_i, M_j – изгибающий опорный момент и моменты в i -м и j -м сечениях соответственно; B_1, B_i, B_j – жесткость опорного сечения и жесткость в i -м и j -м сечениях соответственно; $\alpha = 1/(1 + Nl_0^2/6n^2B_i)$.

Определив из уравнения равновесия и условий опирания концов элемента значения начальных параметров и раскрыв функцию нагрузки, можно получить уравнение состояния элемента с любым закреплением на концах.

Для оценки напряженно-деформированного состояния нормального сечения используется деформационный метод, согласно которому при расчете задаются не приростом нагрузки, а приростом деформаций. В результате для каждого значения деформаций на любом этапе загрузки образца задача имеет единственное решение. Опыт показывает, что при расчете наиболее рационально задаваться величинами деформаций более сжатого волокна $\varepsilon_{c(1)}$. При этом используются предпосылки, регламентированные на сегодняшний день действующими в Украине нормами [1].

Обобщение полученных расчетных зависимостей и предпосылок позволило разработать методику расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке. В методику включен единый алгоритм определения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений стержня де-

формационным методом с последующим определением состояния элемента в целом [2].

Однако расчет устойчивости гибких внецентренно сжатых элементов с использованием «точной» методики является достаточно трудоемким. Поэтому для упрощения расчетного аппарата авторами была разработана методика определения несущей способности гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов, подобная используемой в правилах [3], которые основаны на оценке прочности наиболее напряженного сечения. Однако, в отличие от последней, согласно которой жесткость сечения в расчетах определяется приближенно с помощью ряда эмпирических коэффициентов, упрощенная методика, предложенная нами, базируется на использовании реальных жесткостей сечений, полученных в результате определения их напряженно-деформированного состояния деформационным методом. Таким образом, достигается большая точность получаемых результатов.

Основные принципы и формулы расчета по упрощенной методике приведены в [4].

Для подтверждения правомерности предложенных методов расчета был запланирован и выполнен физический эксперимент.

Экспериментальные исследования предусматривали испытание основных образцов (шарнирно закрепленных на концах железобетонных гибких стоек (и вспомогательных (бетонных кубов, призм, арматурных стержней). Всего было испытано четыре серии образцов-стоек по три образца в каждой, 15 кубов, 18 призм и шесть образцов арматурных стержней. Образцы были изготовлены из бетона класса С65/70.

Основные экспериментальные исследования выполнялись на железобетонных стойках с проектными размера-

ми поперечного сечения 120х60 мм и длиной 1,5 м.

Особенностью методики исследования было то, что загрузка стоек выполнялась не в долях от нагрузки, а в долях от деформаций, которые отвечают вершине диаграммы деформирования бетона $\varepsilon_{c(1)}$. Благодаря этому удалось зафиксировать момент потери устойчивости железобетонных образцов и получить нисходящие ветви деформирования.

Методика и основные результаты экспериментальных исследований работы гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек приведены в [5].

Среди полученных результатов во время испытаний железобетонных стоек следует отметить следующие.

При испытании всех гибких железобетонных опытных образцов была зафиксирована потеря устойчивости: она наступала значительно раньше, чем происходило разрушение материала стоек. Это наглядно иллюстрируется на диаграммах, приведенных на рис. 1. Кривые имеют характерное очертание с экстремумом, а большинство из них – достаточно протяжный ниспадающий участок. Как и ожидалось, варьирующий в данном эксперименте фактор существенным образом повлиял на значение критической нагрузки для опытных образцов. Так, при увеличении эксцентриситета с 2,5 мм в первой серии образцов до 20 мм для четвертой среднее значение критической нагрузки в пределах одной серии уменьшилось в 3,6 раза, а максимальный прогиб, соответствующий этому значению нагрузки, увеличился в 2,7 раза. Разрушение материала образцов, как и ожидалось, происходило в наиболее напряженной зоне – зоне действия максимального момента в среднем по длине образца участке.

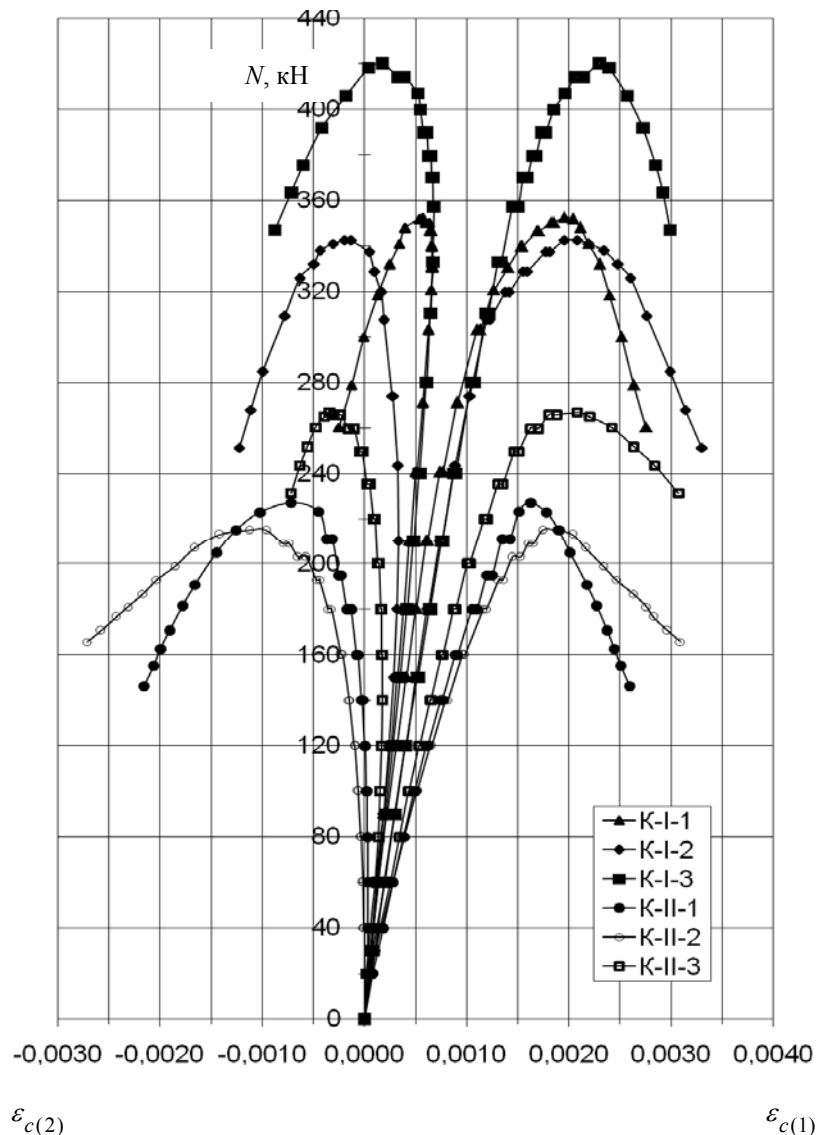


Рис. 1. Диаграммы деформирования $N - \varepsilon_{c(1)}, \varepsilon_{c(2)}$ стоек серий К-I и К-II

Результаты испытаний железобетонных стоек приведены в табл. 1.

Для оценки точности и надежности было выполнено сравнение результатов расчета по разработанным методикам, а также полученных согласно методике, отраженной в новых российских нормах [3], с опытными данными (см. табл. 1).

Сравнение выполнялось по двум случайным величинам – по критической нагрузке и прогибу (для «точной» методики) в наиболее напряженном сечении

образца, ему соответствующему. К выборке были отнесены опытные данные, полученные автором, а также результаты испытаний шарнирно опертых гибких стоек, выполненные в разное время А. Н. Бамбурой и Р. Х. Каюмовым (в целом 61 образец).

Статистической обработке подлежали соотношения теоретических и опытных данных вышеупомянутых величин. Результаты статистической обработки приведены в конце табл. 1.

Табл. 1. Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических данных

Автор экспери- мента	Серия образцов	Гиб- кость образ- цов λ	e , мм	f , мм		Расчет Экспе- римент	$N_{\max}$, кН					Расчет Экспери- мент (упрощ. методика)	Расчет Экспери- мент [3]
				Расчет	Экспе- римент		Расчет («точная» методика)	Расчет (упрощ. методи- ка)	Расчет [3]	Экспе- римент	Расчет Экспери- мент («точная» методика)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
А. Н. Бамбура [6]	400-Иц	35	3,5	11,6	12,6	0,92	128,0	127,7	105,0	122,1	1,05	1,05	0,86
				11,9	12,1	0,98	124,1	125,5	103,9	113,2	1,10	1,11	0,92
				10,9	11,9	0,92	129,2	128,3	104,2	117,1	1,10	1,10	0,89
	400-Ие		10,0	12,0	13,1	0,92	69,3	66,1	75,5	60,1	1,15	1,10	1,26
				11,9	14,8	0,80	72,9	66,8	76,0	69,2	1,05	0,97	1,10
				11,4	12,5	0,91	75,0	69,0	76,4	71,0	1,06	0,97	1,08
	400-Иц		3,5	9,9	13,6	0,73	115,4	111,9	96,4	105,4	1,09	1,06	0,91
				9,1	13,3	0,68	117,6	110,6	93,5	101,0	1,16	1,10	0,93
				9,7	13,5	0,72	116,0	112,3	94,1	105,4	1,10	1,07	0,89
	800-Иц		3,5	13,1	15,2	0,86	152,9	154,1	116,5	130,4	1,17	1,18	0,89
				12,3	14,8	0,83	164,0	156,0	116,1	148,5	1,10	1,05	0,78
				12,7	15,1	0,84	160,1	153,2	115,6	126,2	1,27	1,21	0,92
	800-Ие		10,0	13,3	13,3	1,00	79,0	81,2	83,1	75,1	1,05	1,08	1,11
				12,5	14,2	0,88	80,2	80,4	82,7	64,0	1,25	1,26	1,29
				12,9	13,2	0,98	77,5	82,1	84,0	76,2	1,02	1,08	1,10
	800-Иц		3,5	10,8	14,5	0,74	158,4	163,1	119,0	155,2	1,02	1,05	0,77
				10,6	12,5	0,85	160,2	165,2	119,6	162,0	0,99	1,02	0,74
				11,4	13,1	0,87	154,0	162,0	118,2	132,1	1,17	1,23	0,89
В. В. Гичко	К-I	25	2,5	8,2	8,9	0,92	370,0	321,5	270,2	352,0	1,05	0,91	0,77
				7,9	6,9	1,14	374,1	320,2	269,3	342,5	1,09	0,93	0,79
				7,5	7,9	0,95	377,6	323,8	271,8	420,1	0,90	0,77	0,65
	К-II		10,0	11,8	10,5	1,12	216,8	182,9	179,0	227,3	0,95	0,80	0,79
				12,5	12,2	1,02	211,0	181,7	178,5	215,1	0,98	0,84	0,83
				10,7	10,2	1,05	225,1	183,3	179,3	266,9	0,84	0,69	0,67
	К-III		15,0	14,2	13,7	1,04	149,7	137,8	135,7	160,3	0,93	0,86	0,85
				14,8	13,8	1,07	142,5	135,7	132,2	145,1	0,98	0,94	0,91
				15,1	17,3	0,87	139,0	132,1	131,0	128,7	1,08	1,03	1,02
	К-IV		20,0	18,7	22,3	0,84	98,7	95,3	119,3	97,4	1,01	0,98	1,22
				18,4	21,0	0,88	100,7	96,1	119,6	98,8	1,02	0,97	1,21
				17,6	21,7	0,81	106,3	96,4	118,2	112,6	0,94	0,86	1,05

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Р. Х. Каюмов [7]	K-1	35	7,0	16,7	15,3	1,09	129,8	112,0	97,9	122,3	1,06	0,92	0,80
				16,2	14,8	1,09	132,5	110,4	97,1	115,1	1,15	0,96	0,84
	K-2		4,67	12,4	14,7	0,84	155,0	145,2	112,1	156,4	0,99	0,93	0,72
				12,6	14,3	0,88	153,7	143,6	111,2	152,8	1,01	0,94	0,73
	K-3	25	2,5	6,6	9,0	0,73	330,5	320,1	243,8	300,5	1,10	1,07	0,81
				7,1	8,3	0,86	327,8	318,0	241,9	289,2	1,13	1,10	0,84
				7,0	8,5	0,82	328,4	317,6	241,5	284,1	1,16	1,12	0,85
	K-4	30	3,0	7,9	11,2	0,71	212,3	220,0	165,2	195,3	1,09	1,13	0,85
				8,0	10,6	0,75	211,2	217,3	164,3	188,4	1,12	1,15	0,87
				8,4	9,1	0,92	207,8	219,1	164,7	193,6	1,07	1,13	0,85
	K-5		3,5	8,9	11,8	0,75	146,2	153,1	119,3	153,2	0,95	1,00	0,78
				9,3	11,3	0,82	143,9	155,5	119,0	149,4	0,96	1,04	0,80
				9,5	12,4	0,77	142,4	157,6	118,2	145,7	0,98	1,08	0,81
	K-6	35	7,0	9,3	10,1	0,92	84,3	105,0	99,5	88,1	0,96	1,19	1,13
				9,9	9,7	1,02	79,4	102,4	96,8	68,0	1,17	1,51	1,42
				9,5	9,1	1,04	81,8	102,7	97,6	77,1	1,06	1,33	1,27
	K-7		4,67	7,6	11,9	0,64	86,2	116,1	110,4	93,2	0,92	1,25	1,18
				7,2	11,2	0,64	90,0	118,0	112,9	98,4	0,91	1,20	1,15
				7,4	11,7	0,63	89,4	116,8	111,6	94,1	0,95	1,24	1,19
	K-8	25	2,5	5,4	8,6	0,63	230,7	235,4	224,4	198,3	1,16	1,19	1,13
				5,5	8,8	0,63	222,4	233,1	223,9	194,6	1,14	1,20	1,15
				5,6	8,4	0,67	219,4	238,1	225,8	204,8	1,07	1,16	1,10
	K-9	35	3,5	6,2	9,5	0,65	94,1	117,4	113,9	103,2	0,91	1,14	1,10
				6,3	9,1	0,69	92,8	116,0	113,1	95,1	0,98	1,22	1,19
				6,5	10,5	0,62	90,0	114,8	112,5	94,8	0,95	1,21	1,19
	K-10	25	2,5	6,6	8,1	0,81	171,2	138,4	204,1	152,7	1,12	0,91	1,34
				6,7	7,7	0,87	170,1	137,2	204,9	155,3	1,10	0,88	1,32
				6,3	7,5	0,84	175,2	140,0	205,7	158,7	1,10	0,88	1,30
	K-11	35	3,5	7,5	11,2	0,67	77,0	110,0	106,4	76,0	1,01	1,45	1,40
				7,8	11,8	0,66	75,9	108,1	104,8	75,1	1,01	1,44	1,40
				7,4	9,6	0,77	77,4	108,8	105,6	78,3	0,99	1,39	1,35
$\bar{X}$						0,85					1,05	1,08	1,00
σ						0,158					0,089	0,166	0,213
V_c						0,187					0,085	0,155	0,213
Примечание – $N_{\max}$ – максимальное значение нагрузки, которое отвечает экстремуму на диаграмме $N-f$; f – значение проги- ба в среднем по длине стойки сечения, которое отвечает значению нагрузки, равному $N_{\max}$; $\lambda = l_0 / h$													

Из анализа статистических параметров распределения следует, что предложенные методики расчета дают результаты в оценке критической нагрузки стабильней, чем методика, отраженная в действующих российских нормах, о чем свидетельствует полученный коэффициент вариации, который при расчете по «точной» методике составляет $V_c = 8,5\%$, а по упрощенной методике $V_c = 15,5\%$. При расчете по методике [3] коэффициент вариации составил $21,3\%$.

О качественной сходимости ре-

зультатов расчета по «точной» методике с экспериментальными данными автора на примере серий образцов К-I и К-IV свидетельствуют диаграммы, приведенные на рис. 2, т. е. разработанная методика расчета достаточно хорошо отображает моделируемый ею процесс как количественно, так и качественно.

Оценка точности и надежности расчетных формул выполнялась по методике [8]. Результаты оценки точности и надежности разработанных методик и методики [3] приведены в табл. 2.

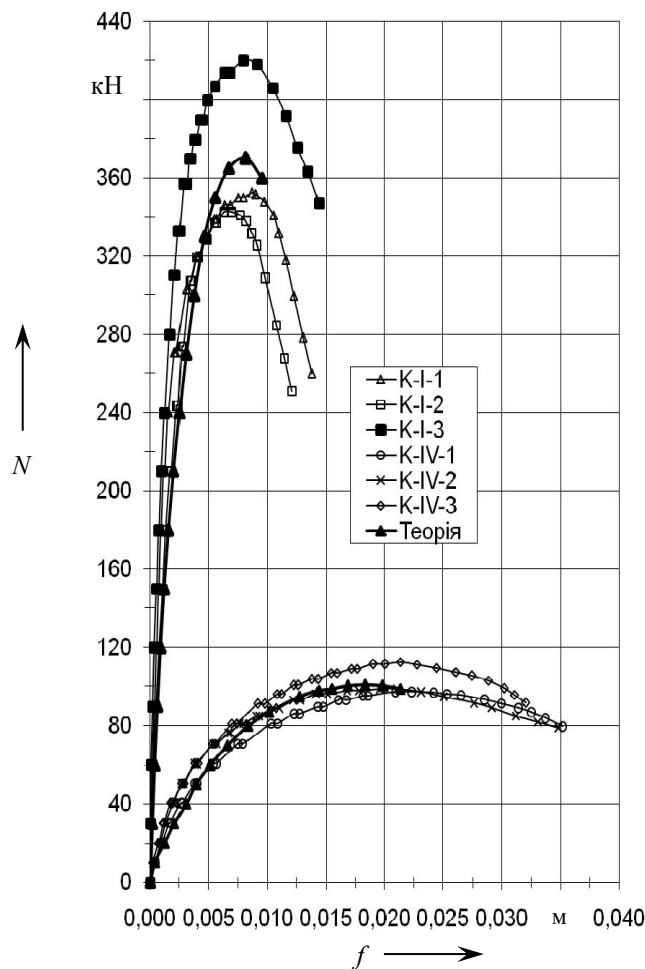


Рис. 2. Диаграммы деформирования $N - f$ стоек серии К-I и К-IV

Табл. 2. Обеспеченность точности расчетных методик

Обеспеченность точности, %	Расчет по «точной» методике	Расчет по упрощенной методике	Расчет согласно [3]
± 5	42,5	26,6	19,0
± 10	73,7	49,7	36,2
± 15	90,9	68,8	51,6
± 20	97,6	82,0	65,3
± 25	99,5	90,7	75,8
Надежность H	0,9998	0,9960	0,9912

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что предложенные методики расчета имеют достаточно высокую точность.

Надежность расчета H , согласно «точной» методике, составила 0,9998, по упрощенной – 0,9960, по методике [3] – 0,9912.

Выводы

1. На основе аппроксимации изогнутой оси кубическим сплайном получено уравнение состояния для гибкого внецентренно сжатого железобетонного элемента, которое учитывает изменение жесткости по его длине на всех этапах загрузки образца. Уравнение справедливо при любых условиях закрепления на опорах.

2. Разработана «точная» методика расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке, базирующаяся на использовании реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры и деформационного метода.

3. Установлено влияние на теоретическое значение критической нагрузки для гибких стоек количества участков разбиения гибких элементов по длине – при расчете по «точной» методике рекомендуется ограничиться раз-

биением элемента на восемь участков.

4. Оценка точности и надежности предложенной методики расчета устойчивости гибких элементов показала высокую точность и достаточную надежность.

5. Разработан упрощенный метод расчета гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов. Анализ сопоставления значений несущей способности, вычисленной с привлечением указанного метода, с опытными данными свидетельствует об удовлетворительной точности и надежности получаемых результатов и может быть рекомендован к применению на практике. Предложенный метод рекомендуется применять при значении относительного эксцентриситета продольной силы e/h , равном не менее чем 0,15.

6. В результате экспериментальных исследований выявлены закономерности поведения гибких шарнирно опертых железобетонных элементов из высокопрочного бетона в зависимости от величины эксцентриситета приложения кратковременной нагрузки.

7. Целесообразным следует считать использование разработанных методик при расчете пространственных железобетонных конструкций.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [Чинний від 2011-06-01]. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
2. Гічко, В. В. Несуча здатність гнучких позациентрово стиснутих стійок деформаційним методом / В. В. Гічко // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-тех. зб. – 2011. – № 74, кн. 1. – С. 623–628.
3. СНиП 52.01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М. : Госстрой России, 2004. – 194 с.
4. Бамбура, А. М. Визначення стійкості залізобетонних гнучких позациентрово стиснутих елементів за спрощеною методикою / А. М. Бамбура, В. В. Гічко // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-тех. зб. – 2013. – № 78, кн. 2. – С. 64–71.
5. Гічко, В. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану позациентрово стиснутих гнучких стійок / В. В. Гічко // Вісн. Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – № 38. – С. 138–143.
6. Бамбура, А. Н. Исследование кратковременной устойчивости сжатых железобетонных элементов при нешарнирном закреплении на концах: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Бамбура Андрей Николаевич. – Киев, 1978. – 199 л.
7. Каюмов, Р. Х. Устойчивость гибких железобетонных стержней из высокопрочного бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Каюмов Рашид Хайретдинович. – Киев, 1972. – 201 л.
8. Лычёв, А. С. Надёжность железобетонных конструкций : учеб.-метод. пособие / А. С. Лычёв, В. П. Корякин. – Куйбышев, 1974. – 123 с.

Статья сдана в редакцию 11 декабря 2014 года

Виталий Викторович Гичко, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций. E-mail: wit.82@ukr.net.

Vitaly Viktorovich Gichko, research fellow, State Research Institute of Steel Structures. E-mail: wit.82@ukr.net.

ФИЗИКА

В порядке дискуссии

УДК 530:372.8

А. И. Ляпин

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

UDC 530:372.8

A. I. Lyapin

SPACE AND TIME IN PHYSICAL TERMINOLOGY

Аннотация

На основе анализа известных концептуальных понятий пространства и времени сформулированы их новые определения применительно к физике. Показано, что новые определения, будучи образными и конкретными, содержат все атрибуты известных определений.

Ключевые слова:

пространство, модель, время, физическая величина, терминология.

Abstract

Based on the analysis of well-known conceptual definitions, new Space and Time definitions are obtained applied to physics. It is shown that new figurative and specific definitions contain all the attributes of the «old» ones.

Key words:

space, model, time, physical quantity, terminology.

Введение

Научное понятие является элементом системы научных знаний. Его основное назначение состоит в том, что «как результат обобщенного теоретического мышления, понятие служит средством дальнейшего познания» [1, с. 207]. По мере развития науки понятия также развиваются: уточняются и обогащаются или отбрасываются как несостоятельные и трансформируются в новые понятия, понятия более высокого порядка.

Анализ современной научной литературы, посвященной понятиям «про-

странство» и «время», показывает, что в большинстве работ отражена критика концепции, лежащей в основе рассматриваемых понятий. При этом авторы дают современную интерпретацию «древних» определений. В ряде работ обычные понятия пространства и времени вовсе лишены смысла [2].

Большинство авторов научных и научно-методических работ исходят из того, что рассматриваемые понятия общеизвестны. Однако «общеизвестными» они являются до тех пор, пока не возникает необходимость дать обучающимся определения этих понятий. Методоло-

гия обучения предполагает, что при изложении любого материала необходимо пользоваться терминами, которые определены.

Цель работы состоит в том, чтобы найти методически обоснованные формулировки определений пространства и времени. Первое обоснование определений этих категорий как физических понятий дано автором в [3, 4].

Чтобы исключить сомнения в правильности интерпретации рассуждений (определений), приводимых в первоисточниках, ссылка на них (в важных, на наш взгляд, случаях) приводится на языке оригинала. Кроме того, выбор существующего перевода иноязычного источника определялся соображениями его максимального соответствия оригиналу. Поэтому были установлены следующие критерии:

- перевод не должен быть слишком удален по времени от оригинала;
- перевод должен быть с языка оригинала. В работе [5] анализируются неточности английского перевода работы Ньютона [6];
- компетентность переводчика.

Автором в качестве перевода «Начал» Ньютона выбрана работа [7]. При этом перевод ключевых слов проверялся по латинско-русскому словарю [8].

Пространство

Ниже рассмотрены некоторые известные определения пространства, в которых больше физического содержания (при этом не подвергается сомнению его философская сущность). Сначала проведен формальный анализ и формально дано новое определение, затем показано, как оно соотносится с известными определениями.

Анализ литературы, посвященной рассматриваемой теме, показывает, что существуют два концептуальных определения пространства – «субстанциональное» и «реляционное». Далее приведены примеры «субстанциональных» определений.

«Можно с полным правом утверждать, что подобно тому, как время есть форма потока сознания, пространство есть форма материальной действительности» [9, с. 15].

«Пространство как физическая категория – форма существования материи» [10].

«Пространство и время – категории, обозначающие основные формы существования материи. Пространство выражает порядок сосуществования отдельных объектов, время – порядок смены явлений» [11].

«Пространство – это философская категория, которая выражает способ существования материи» [12].

Наиболее полное «реляционное» определение пространства дается в [13]: «Пространство и время в физике определяются в общем виде как фундаментальные структуры координации материальных объектов и их состояний: система отношений, отображающая координацию сосуществующих объектов (расстояния, ориентацию и т. д.), образует пространство, а система отношений, отображающая координацию сменяющихся друг друга состояний или явлений (последовательность, длительность и т. д.), образует время».

Следует отметить смену концепций в науке [11, 13]. Действительно, если в «Физическом энциклопедическом словаре», изданном в 1983 г., пространство и время определяются как формы существования материи, в первом томе «Физической энциклопедии», изданной в 1988 г., время все еще определяется как форма существования материи, то уже в четвертом томе этой же энциклопедии, изданной в 1994 г., пространство и время определяются как системы отношений. То есть в течение 11 лет в советской (русской) физической науке «субстанциональная» концепция уступила место «реляционной» (автор не претендует на открытие этого исторического факта).

Сравнивая два концептуальных

определения пространства, можно согласиться с авторами [13] в том, что к физике ближе «реляционное», поэтому в дальнейшем оно и рассматривается.

Определение любого понятия предполагает наличие определяемого и определяющего. Для лучшего восприятия понятия структура его определения должна соответствовать логической последовательности: определяемое – определяющее [1, 14].

С учетом этого требования перефразируем часть оригинала [13], связанную с пространством, и сконструируем тождественное ей предложение: «Пространство в физике (в общем виде) – это фундаментальная структура координации материальных объектов: пространство образуется системой отношений, которая отображает координацию сосуществующих объектов (расстояния, ориентацию и т. д.)».

Следует признать, что такое определение содержит все атрибуты оригинала. Будучи правильно структурированным, вместе с тем, оно не является простым для восприятия обучающимися. Поэтому попытаемся получить более приемлемую его формулировку.

Не затрагивая «фундаментальной» части полученного выше определения, пояснение к ней сформулируем следующим образом: «Пространство – это мысленный образ, образованный системой отношений, которая отображает координацию сосуществующих объектов (расстояния, ориентацию и т. д.)».

В современной терминологии последнее определение по своей сути соответствует вполне определенному термину «модель» [15, с. 22]: «Под моделью понимается такая мысленно представляемая или материально реализуемая система, которая отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте».

Таким образом, «пространство» можно определить как «модель», кото-

рая не только отображает и воспроизводит объект исследования, но и позволяет получить о нем новую информацию. То есть указанная замена, конкретизируя, одновременно усиливает значение (назначение) определяемого.

Поэтому «приравнивание» рассмотренных терминов можно считать приемлемым и дать следующее определение пространству в физике: «Пространство – это модель объективной реальности, отображающая координацию сосуществующих объектов (расстояния, ориентацию и т. д.)».

Данное определение является разным и понятным.

Корректность полученного определения можно оценить по тому, как оно соотносится с известными определениями.

Определение пространства Ньютоном [6, с. 5] в переводе [7, с. 30] сформулировано следующим образом: «*Абсолютное пространство* по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное пространство есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное: так, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли. По виду и величине абсолютное и относительное пространства одинаковы, но численно не всегда остаются одинаковыми».

Проанализировав ньютоновское определение пространства, можно утверждать, что Ньютон рассматривает пространство как математическую модель (мысленный образ). Помимо этого, следует отметить, что существующие в физике пространства с различной метрикой (Эвклида, Римана, Лобачевского, Эйнштейна и т. п.) по сути также пред-

ставляют собой математические модели. Подтверждением сделанных выводов может служить работа по теории относительности [16, с. 34]: «Следует также четко представлять, что сама по себе пространственно-временная диаграмма – это математическая модель, основанная на понятии линейного векторного пространства ... Линейное векторное пространство является обобщением привычного трехмерного пространства, с которым мы работаем в механике и электродинамике».

Аналогичное подтверждение можно найти в [16, с. 66] и других работах.

Следовательно, определение пространства понятием «модель» можно считать обоснованным.

Анализируя ньютоновское определение пространства, можно отметить такой «исторический казус»: абсолютное пространство у Ньютона не связано с какой-либо субстанцией! Поэтому современное утверждение о том, что механика Ньютона основана на «субстанциональной концепции» не соответствует действительности. Тем более, что в предисловии к первому изданию «Начал» Ньютон писал: «CUM veteres Mechanicam (uti auctor est Pappus) in rerum naturalium investigatione maximi fecerint; & recentiores, *missis formis substantialibus & qualitatibus occultis*, phaenomena naturae ad leges mathematicas revocare aggressi sint: Visum est in hoc tractatu mathesin excolere, quatenus ea ad philosophiam spectat», или в переводе: «Так как древние, по словам Паппуса, придавали большое значение механике при изучении природы, то новейшие авторы, *отбросив субстанции и скрытые свойства*, стараются подчинить явления природы законам математики. В этом сочинении имеется в виду тщательное развитие приложений математики к физике» [7, с. 4].

На названный «исторический казус» указывает и автор работы [17].

Таким образом, для формирования более конкретного (осознанного) поня-

тия «пространство» можно использовать понятие «модель».

В век компьютерного моделирования трудно найти студента, который не знал бы значение слова «модель». Более того, представление о моделях формируется уже в старших классах средней школы. Это означает, что предлагаемое определение вполне постижимо даже в школе и отвечает современному уровню знаний.

Время

Для формулировки определения понятия «время» сначала проведен формальный анализ, формально дано новое определение, показано, как оно соотносится с известными. При этом основное внимание уделено «реляционному» определению, приведенному в [13].

Обстоятельное обсуждение понятия «время» проведено в [18], где автор указывает на то, что «Аристотелю принадлежит создание первой в истории науки физики – науки о природе и, следовательно, первых теорий движения и взаимодействия. Отсюда понятно, насколько важной для него была необходимость в определении того, что есть время, и мы видим, что время и движение у Аристотеля, во всяком случае, неразделимы. Поэтому Аристотель рассматривает проблему времени именно в «Физике», где время оказывается связанным с непосредственно измеряемой *величиной движения*».

С точки зрения автора [18], всем физикам и математикам, так или иначе касающимся «проблемы времени», следует в первую очередь изучить «Физику» Аристотеля. В настоящей работе на основе анализа рассуждений Аристотеля [19] сформулировано новое определение времени.

Далее приведены фрагменты из [19], которые определяют основные свойства времени, установленные Аристотелем. Выводы автора выделены курсивом.

«Итак, что время не есть движение, но и не существует без движения – это ясно. Поэтому, когда мы исследуем, что такое время, нужно начать [именно] отсюда [и выяснить], что же такое время в связи с движением. Ведь мы вместе ощущаем и движение, и время» [19, с. 147].

«Преыдущее и последующее существуют в движении и по субстрату тождественны с движением, хотя бытие их иное, а не движение» [19, с. 148].

«... а время и движение всегда существуют совместно – как в возможности, так и в действительности» [19, с. 157].

Время не есть движение и изменение, но и не существует без них.

«... ибо когда мы мыслим крайние точки отличными от середины и душа отмечает два «теперь» – преыдущее и последующее, тогда это (именно) мы и называем временем, так как ограниченное (моментами) «теперь» и кажется нам временем» [19, с. 148].

«... ибо время есть не что иное, как число движения по отношению к преыдущему и последующему» [19, с. 148].

Время есть число движения и изменения (длительность).

«Что время, таким образом, есть число движения в отношении к преыдущему и последующему и, принадлежа непрерывному, само непрерывно – это ясно» [19, с. 150].

Время непрерывно и необратимо.

«Ясно также, что время не называется быстрым и медленным, а большим и малым, долгим и коротким. Поскольку оно непрерывно, оно долгое и короткое, поскольку оно число – большое и малое, а быстрым и медленным не бывает; ведь ни одно из чисел, служащих для счета, не может быть быстрым и медленным» [19, с. 151].

Время объективно отражает свойство события.

«Очевидно также, что находиться во времени не значит существовать, когда

существует время, т. к. находиться в движении и месте не значит существовать, когда существует движение и место.

Так как быть во времени – значит быть в числе, то можно взять время большее всякого, в котором находится что-либо, существующее во времени; поэтому все находящееся во времени необходимо объемлется временем, как и все другое, что находится в чем-нибудь, например, как находящееся в месте объемлется местом» [19, с. 152–153].

Время имеет упорядоченную шкалу значений, отражает координацию событий.

«Может также возникнуть вопрос: для какого именно движение есть число? Или для всякого? Ведь во времени все возникает, гибнет, растет, качественно меняется и перемещается; поскольку все это есть движение, постольку время есть число каждого движения. Поэтому оно есть число непрерывного движения вообще, а не какого-нибудь определенного вида» [19, с. 157].

Существует общее время для различных изменений.

«Так как первичное движение – перемещение, а в нем – движение по кругу и каждая (вещь) исчисляется родственной ей единицей: монады – монадой, лошади – лошадью, – то и время измеряется каким-нибудь определенным временем, причем, как мы сказали, и время измеряется движением, и движение временем (это значит, что временем определенного движения измеряется количество и движения, и времени). Следовательно, если первичное есть мера всего родственного, то равномерное круговое движение есть мера по преимуществу, т. к. число его наиболее доступно (для определения)» [19, с. 158].

Общее время имеет размер.

Объединив все указанные свойства, можно утверждать, что время:

– не есть движение и изменение, но и не существует без них;

– есть число движения и изменения (длительность);

- непрерывно и необратимо;
- объективно отражает свойство события;
- имеет упорядоченную шкалу значений, отражает координацию событий;
- общее для всех событий;
- имеет размер.

Все эти свойства явно и косвенно отражены в современном определении времени [13]. Вместе с тем, они присутствуют в определении физической величины [20]: «Физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них».

Физическая величина:

- не являясь изучаемым объектом, не существует без него;
- является количественной характеристикой объекта;
- может принимать как непрерывные, так и дискретные значения;
- отражает свойство объекта и имеет размер.

Сравнивая характерные свойства времени и физической величины, нетрудно видеть, что они совпадают.

На основании этого можно следующим образом определить «время»: время в физике – это физическая величина, отображающая координацию сменяющихся друг друга состояний или явлений (последовательность, длительность и т. д.). Это определение, не отрицая известное, конкретизирует его. Здесь абстрактное общее, образуемое системой отношений, определено конкретным термином – «физическая величина».

Подтверждение обоснованности сформулированного определения можно найти в «Системе единиц» [20]: «Так, система величин механики, в которой в качестве основных приняты длина L , масса M и время T , должна называться системой LMT». Кроме того, в учебных пособиях по физике время определяется

как одна из основных физических величин.

Следует отметить, что в [18] также предлагается рассматривать время как физическую величину, однако не приводится конкретного определения.

Приведем для сравнения определение времени Ньютоном: «*Tempus absolutum, verum, & mathematicum, in se & natura sua sine relatione ad externum quodvis, æquabiliter fluit, alioque nomine dicitur duratio: Relativum, apparens, & vulgare est sensibilis & externa quævis durationis per motum mensura (seu accurata seu inæquabilis) qua vulgus vice veri temporis utitur; ut hora, dies, mensis, annus*» [6, с. 5], что на русском звучит как: «*Абсолютное, истинное математическое время* само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью. *Относительное, кажущееся* или *обыденное время* есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения, мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как то: час, день, месяц, год» [7, с. 30].

Можно утверждать, что абсолютное время по Ньютону, по сути, есть не что иное, как общее время Аристотеля, т. е. также физическая величина.

Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что в научной и учебной литературе имеется ряд фактов использования термина «пространство» как модели и повсеместное использование термина «время» как физической величины. Автором предлагается «узаконить» указанные факты в виде сформулированных выше определений.

На первый взгляд может показаться, что работа представляет собой игру в слова и ничего нового не привносит в науку. Однако следует учитывать то, что она затрагивает фундаментальные понятия, которые «... во многом опре-

деляют структуру (метрическую, топологическую и т. д.) фундаментальных физических теорий, задают структуру эмпирической интерпретации и верификации физических теорий, структуру операционных процедур, а также организуют физические картины мира» [13].

Заключение

В работе проведен анализ известных понятий «пространство» и «время» и сформулированы их новые определения.

Пространство – это модель объективной реальности, отображающая координацию сосуществующих объектов (расстояния, ориентацию и т. д.).

Время – это физическая величина, отображающая координацию сменяющихся друг друга состояний или явлений (последовательность, длительность и т. д.).

Сформулированные определения отражают факты использования в научной и учебной литературе термина «пространство» как модели и термина «время» как физической величины; они должны способствовать формированию более конкретных (осознанных) представлений о пространстве и времени, могут послужить импульсом для дальнейших исследований и помочь очистить научный физический язык от различных некорректных определений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

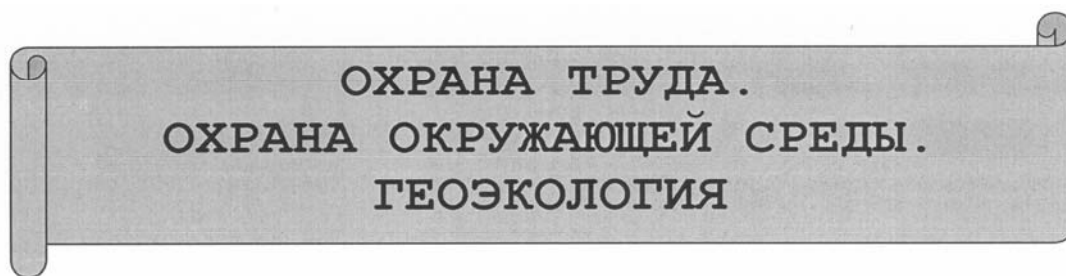
1. Основы методики преподавания физики. Общие вопросы / Л. И. Резников [и др.]. – М.: Просвещение, 1965. – 320 с.
2. Гришук, Л. П. Полные космологические теории / Л. П. Гришук, Я. Б. Зельдович // Квантовая гравитация «Квантовая теория гравитации»: сб. тр. – М.: ИЯИ, 1982. – С. 39–47.
3. Ляпин, А. И. О формировании фундаментальных понятий физики / А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию МГУ им. А. А. Кулешова. – Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова, 2013. – С. 61–63.
4. Ляпин, А. И. Пространство и время в новой терминологии / А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова // Физическое образование: современное состояние и перспективы: материалы Респ. науч.-практ. семинара, посвящ. 65-летию физико-математического факультета МГУ им. А. А. Кулешова. – Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова, 2014. – С. 86–87.
5. Smith, G. Newton's Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica [Электронный ресурс] / G. Smith. – Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2008. – Режим доступа: URL: <http://plato.stanford.edu/entries/newton-principia/>. – Дата доступа: 14.11.2014.
6. Newton, Is. Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica: editio tertia / Is. Newtono // Sir Isaac Newton's Principia: reprinted for Sir William Thomson LL. D. and Hugh Blackburn M. A. – Glasgow: Glasgow university, MDCCCLXXI (1871).
7. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии: пер. с лат. / И. Ньютон // Сб. тр. в 12 т. – М.; Л.: АН СССР, 1936. – Т. 7. – 687 с.
8. Дворецкий, И. Х. Латинско-русский словарь / И. Х. Дворецкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Русский язык, 1976. – 1096 с.
9. Вейль, Г. Пространство, время, материя. Лекции по общей теории относительности: пер. с нем. / Г. Вейль. – 5-е изд., перераб. – М.: Янус, 1996. – 480 с.
10. Савченко, В. Н. Начала современного естествознания: тезаурус / В. Н. Савченко, В. П. Смагин. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 336 с.
11. Пространство и время // Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. – М., 1983. – 928 с.
12. Кикель, П. В. Краткий энциклопедический словарь философских терминов / П. В. Кикель, Э. М. Сороко. – Минск: БГПУ, 2006.
13. Пространство и время // Физическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. А. М. Прохорова. – М., 1994. – Т. 4. – С. 156.

14. **Ляпин, А. И.** Проблема терминологии в современных учебных пособиях и пути ее решения / А. И. Ляпин, В. В. Глущенко, Е. В. Пивоварова // Оптика неоднородных сред – 2011 : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Могилев : МГУ им. А. А. Кулешова, 2011. – С. 318–320.
15. **Штофф, В. А.** Моделирование и философия / В. А. Штофф. – М. : Наука, 1966. – 304 с.
16. **Берке, У.** Пространство–время, геометрия, космология : пер. с англ. / У. Берке. – М. : Мир, 1985. – 416 с.
17. **Rynasiewicz, R.** Newton's Views on Space, Time and Motion [Электронный ресурс] / R. Rynasiewicz. – Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2007. – Режим доступа : <http://philosophy.jhu.edu/bios/robert-rynasiewicz>. – Дата доступа : 18.11.2014.
18. **Попов, В. Г.** Физика и метафизика времени [Электронный ресурс] / В. Г. Попов. – МГУ, 2007. – С. 39–60. – Режим доступа : <http://www.chronos.msu.ru/old/nameindex/popov.html>. – Дата доступа : 19.11.2014.
19. **Аристотель.** Физика / Аристотель // Соч. : в 4 т. – М. : Ин-т философии, 1981. – Т. 3, кн. 4.
20. **Физическая величина** [Электронный ресурс] / Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы. – Режим доступа : <http://www.vniims.ru/inst/termin/fizvel.html>. – Дата доступа : 27.11.2014.

Статья сдана в редакцию 13 января 2015 года

Али Ибрагимович Ляпин, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: ali_lyapin@tut.by.

Ali Ibragimovich Lyapin, PhD (Physics & Mathematics), Associate professor, Belarusian-Russian University.
E-mail: ali_lyapin@tut.by.



УДК 631.811.944:631.53.011-582.475.4 [631.543.3]

Г. Н. Фадькин, Д. В. Виноградов, А. В. Щур

ВЛИЯНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЖЕЛЕЗА НА ВЫХОД ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ, ПРИГОДНОГО ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОСАДКИ

UDC631.811.944:631.53.011-582.475.4 [631.543.3]

G. N. Fadkin, D. V. Vinogradov, A. V. Shchur

EFFECT OF IRON NANOCRYSTALLINE POWDER ON THE YIELD OF SCOTS PINE PLANTING MATERIAL SUITABLE FOR MECHANIZED PLANTING

Аннотация

В статье описаны исследования обработки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) нанопорошком железа для получения посадочного материала, пригодного для механизированной посадки. В качестве гипотезы выдвинута замена использования препаратов, содержащих микроэлементы и стимуляторы роста, на нанопорошок железа. Выявлено, что в вариантах с применением нанопорошка железа формируется более компактная корневая система, не снижающая линейный рост надземной части.

Ключевые слова:

нанопорошок железа, лесные ресурсы, сосна обыкновенная, посадочный материал, корневая система, микроэлементы, стимуляторы роста.

Abstract

The paper describes the studies of Scots pine seeds treatment (*Pinus sylvestris*) with iron nanopowder to obtain planting material suitable for mechanized planting. A hypothesis was made to replace preparations containing microelements and growth stimulants by iron nanopowder iron. It was found that specimens treated with iron nanopowder formed a more compact root system which did not reduce linear growth of the aerial part of a plant.

Key words:

iron nanopowder, forest resources, Scots pine, planting material, root system, microelements, growth promoting factors.

Введение

Лесной сектор играет важную роль в экономике страны и имеет

большое значение для социально-экономического развития более чем 40 субъектов Российской Федерации. В

целом доля лесного сектора в экономике РФ составляет около 4 %.

Потребление лесных ресурсов превышает производственные силы природы, поэтому остро встает проблема совершенствования ведения лесного хозяйства, обеспечения непрерывного и рационального использования и воспроизводства лесов. В этих условиях создание высокопродуктивных лесных культур с механизированной посадкой сеянцев и саженцев является важным направлением лесовосстановления. Для решения данной задачи необходимо постоянное совершенствование технологии выращивания посадочного материала с учетом конкретных почвенно-климатических условий. В современных условиях в целях улучшения посевных качеств семян и усиления энергии прорастания используют различные способы выведения их биологической системы из состояния покоя.

Основная часть

Одной из актуальных задач лесного хозяйства в настоящее время является повышение посевных качеств семян хозяйственно-ценных хвойных пород [2]. Это вызвано, во-первых, периодичностью семяношения многих из них, особенно таких как сосна, в том числе обыкновенная, во-вторых, снижением в процессе хранения посевных качеств: энергии прорастания, всхожести.

Результативность искусственных лесов во многом зависит от жизнеспособности биологической системы семян в период их посева в грунт, и это недостаточно учитывается при выращивании посадочного материала. Подтверждением этому в определенной степени являются завышенные нормы высева. Так, в соответствии с действующими нормами при выращивании сеянцев сосны обыкновенной на 1 п. м посевной строчки высевают 270...450 семян, а плановый выход се-

янцев составит 2200 тыс. шт./га [3].

Для повышения биологической активности семян в этот период применяют различные способы подготовки их к посеву. Так, в настоящее время обнаружено и изучено в той или иной степени более 5 тыс. соединений химического, микробиологического и растительного происхождения, обладающих регуляторным действием. Из них в мировой практике используется около 1 %. Вышли на стадию практического применения препараты третьего поколения, гектарные дозы которых исчисляются миллиграммами. В последнее время используются экологически чистые биопрепараты на основе молочно-кислых бактерий и полезных микроорганизмов, обеспечивающих активацию прорастания семян в грунте [7].

Теоретические и экспериментальные поисковые исследования, проведенные А. Р. Родиным и Е. А. Калашниковой [4], позволяют считать, что перспективным способом подготовки семян хвойных пород является предпосевная обработка их путем использования нанотехнологий.

Активизация жизнеспособности биологической системы семян, повышение грунтовой всхожести и усиление роста проростка достигается обработкой семенного материала наноразмерными частицами металлов [11]. Эти частицы имеют размер от 18 до 50 нм, что позволяет им легко проникать через поры и распределяться внутри семени. Активные компоненты нанопорошков составляют металлы (железо, медь, марганец, цинк и магний) в ультрадисперсном состоянии [5]. Эти препараты обладают уникальными свойствами: они экологически безопасны, экономически выгодны и способствуют более эффективному повышению продуктивности растений [1, 6]. Кроме того, обработка семян наночастицами металлов обеспечивает формирование из семян высококачественных сеянцев.

венного посадочного материала с его дальнейшим сохранением [9].

Таким образом, актуальность выполненных исследований, направленных на обоснование технологии обработки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) нанопорошком железа, определяется современными проблемами искусственного лесовосстановления как в отношении успешного восстановления лесов, так и в отношении механизации лесокультурных работ.

Цель работы заключалась в исследовании обработки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) нанопорошком железа для получения посадочного материала, пригодного для механизированной посадки. В качестве гипотезы выдвинута замена использования препаратов, содержащих микроэлементы и стимуляторы роста, на нанопорошок железа.

Семена, выходя из состояния покоя, должны поглотить некоторое количество воды для того, чтобы у них возобновились физиологические процессы, связанные с прорастанием. Абсолютное количество воды, необходимое для начала прорастания, относительно невелико, как правило, оно не превышает 2...3-кратного веса семян. Растущий проросток нуждается в большом количестве воды, и эта потребность возрастает с усилением транспирации. В связи с этим в лабораторном опыте изучалось действие нанопорошков железа на лабораторную всхожесть и энергию прорастания семян сосны обыкновенной в сравнении с регуляторами роста. Замачивание семян проводилось в водных растворах комнатной температуры.

Прорастание семян и укрепление проростков в естественных условиях в значительной мере зависят от физических свойств почвы, температуры, доступности воды и минеральных веществ. Почва является хорошей средой для посева семян благодаря высокой

способности к фильтрации воды, хорошей аэрации и тесному контакту между частицами почвы и семенами. Другими словами, полевые исследования могут как подтвердить первоначально выдвинутую гипотезу, так и ее опровергнуть. Для этого были проведены полевые опыты на базе временного лесного питомника, расположенного в Мурманском участковом лесничестве (Рязанская обл.). Почва опытного участка дерново-подзолистая супесчаная, рельеф выровненный. Площадь делянки 2,4 м², повторность 4-кратная. Расположение делянок рендомизированное.

Схема опытов.

1. Контроль (замачивание семян в дистиллированной воде).
2. Нанокристаллический порошок Fe – 0,001-процентный раствор.
3. Нанокристаллический порошок Fe – 0,01-процентный раствор.
4. Нанокристаллический порошок Fe – 0,1-процентный раствор.
5. Агат-25К – 0,015-процентный раствор (согласно рекомендациям производителя).
6. Циркон, Р – 0,01-процентный раствор (согласно рекомендациям производителя).

В опыте использовались семена второго класса.

Суспензию нанопорошков получали согласно ТУ 931800-001-42720760-96 методом диспергирования навески порошка в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне модели ПСБ-5735-05 в течение 3...5 мин (ультразвуковая обработка в водной среде). Семена перед высевом замачивали в водной суспензией ультрадисперсных металлов размером частиц 20...30 нм. На контроле, где стимуляторы роста и ультрадисперсное железо не применялись, семена замачивались в дистиллированной воде. После намачивания семена подсушивались до состояния сыпучести.

В процессе проведения лабораторных исследований получены сле-

дующие результаты. Энергия прорастания контрольного варианта составила $(44,6 \pm 2,1)$ %. Замачивание семян в растворе нанопорошка железа с концентрацией 0,001 % несколько снизило этот показатель до $(44,0 \pm 2,8)$ %. Увеличение концентрации нанопорошка железа до 0,01 % способствовало повышению энергии прорастания до $(50,9 \pm 2,2)$ %. Дальнейшее повышение концентрации нанопорошка заметно снизило данный показатель. Использование стимуляторов роста (Агат-25К и Циркон, Р) не превысило лучший показатель со внесением нанопорошков железа.

Лабораторная всхожесть (табл. 1) контрольного варианта составила $(63,8 \pm 2,3)$ %. Замачивание семян в растворе нанопорошка железа с концентрацией 0,001 % несколько повысило этот

показатель, и всхожесть составила $(64,8 \pm 4,4)$ %. Увеличение концентрации нанопорошка железа до 0,01 % способствовало повышению лабораторной всхожести до $(69,1 \pm 3,3)$ %. Дальнейшее повышение концентрации нанопорошка заметно снизило данный показатель. Использование стимуляторов роста (Агат-25К и Циркон, Р) не превысило лучший показатель со внесением нанопорошка железа.

Результаты эксперимента, приведенные в табл. 1, показывают, что наилучшим условием, необходимым для повышения лабораторной всхожести семян сосны обыкновенной 2-го класса качества, является применение нанопорошка железа с концентрацией 0,01 % (существенность различия по отношению к контролю $t_{факт} = 10,26 > t_{табл} = 1,96$ соответственно при $P = 0,05$).

Табл. 1. Влияние нанопорошка железа на лабораторную всхожесть семян сосны обыкновенной

Вариант опыта	Среднеарифметическое значение всхожести, %	Процент к контролю	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Контроль	$(63,8 \pm 2,3)$	—	6,8	2,8
Нанопорошок Fe – 0,001-процентный раствор	$(64,8 \pm 4,4)$	102	7,0	4,1
Нанопорошок Fe – 0,01-процентный раствор	$(69,1 \pm 3,3)$	108	7,1	3,9
Нанопорошок Fe – 0,1-процентный раствор	$(61,8 \pm 3,0)$	97	5,1	2,9
Агат-25К	$(66,1 \pm 2,9)$	104	5,8	3,4
Циркон, Р	$(64,4 \pm 3,2)$	101	6,9	4,0

Для сосны обыкновенной предпосевная подготовка семян с использованием нанопорошка железа (концентрация нанопорошка железа 0,001 %) хотя и не изменяет класс, но все же явно улучшает посевные качества: энергию прорастания на 14 %, всхожесть – на 8 %. Одновременно с этим длина корешков проростков семян, обработанных водным раствором нанопорошка

железа, (концентрация нанопорошка железа 0,001 %) значительно больше контрольных – на 36 % (существенность различия по отношению к контролю $t_{факт} = 9,42 > t_{табл} = 1,98$ соответственно при $P = 0,05$).

Грунтовая всхожесть (табл. 2) контрольного варианта составила $(54,2 \pm 2,6)$ %. Замачивание семян в растворе нанопорошка железа с концентра-

цией 0,001 % несколько повысило этот показатель, и всхожесть составила $(56,1 \pm 3,7)$ %. Увеличение концентрации нанопорошка железа до 0,01 % спо-

собствовало повышению энергии прорастания до $(57,9 \pm 4,6)$ %. Дальнейшее повышение концентрации нанопорошка снизило данный показатель.

Табл. 2. Влияние нанопорошка железа на грунтовую всхожесть семян сосны обыкновенной

Вариант опыта	Среднеарифметическое значение всхожести, %	Процент к контролю	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Контроль	$(54,2 \pm 2,6)$	—	6,8	2,8
Нанопорошок Fe – 0,001-процентный раствор	$(56,1 \pm 3,7)$	104	7,0	4,1
Нанопорошок Fe – 0,01-процентный раствор	$(57,9 \pm 4,6)$	107	7,1	3,9
Нанопорошок Fe – 0,1-процентный раствор	$(53,5 \pm 3,9)$	99	5,1	2,9
Агат-25К	$(57,2 \pm 3,9)$	106	5,8	3,4
Циркон, Р	$(55,7 \pm 3,2)$	103	6,9	4,0

Использование стимуляторов роста (Агат-25К и Циркон, Р) не превысило лучший показатель со внесением нанопорошков железа, однако применение Агат-25К максимально приблизило значение грунтовой всхожести к наилучшему варианту (нанопорошок Fe с концентрацией 0,01 %). Дружное и быстрое прорастание семян – необходимое условие получения качественного посадочного материала, т. к. при этом уменьшается угроза повреждения семян насекомыми, грибами или неблагоприятными условиями, а также поедания их птицами или грызунами. Из окружающих факторов, контролирующих прорастание семян, очень важными являются вода, температура, свет, кислород и различные химические вещества [8].

Результаты эксперимента, приведенные в табл. 2, показывают, что наилучшим условием, необходимым для повышения грунтовой всхожести семян сосны обыкновенной 2-го класса качества, является применение нанопорошка железа с концентрацией 0,01 % (существенность различия по отношению к контролю $t_{факт} = 11,43 > t_{табл} = 2,00$ соответственно при $P = 0,05$). В ка-

честве предварительных выводов можно отметить аналогичность результатов лабораторных и полевых исследований.

Заключение

Развивающийся проросток – это сложная система с участками синтеза углеводов, которые в онтогенезе сеянца перемещаются от семядолей к первичной, а затем ко вторичной хвое. Существует тесная зависимость роста позднее развивающейся хвои от способности к синтезу необходимых для роста веществ ранее появившихся листовых зачатков, т. е. развитие первичной хвои зависит от вклада семядолей, а развитие вторичной хвои, в свою очередь, – от вклада, внесенного первичной хвоей. Молодой проросток на стадии семядолей функционирует с максимальной потребностью в питательных веществах для роста, поэтому он очень чувствителен к действию факторов среды. В начале онтогенеза окружающие условия, в частности обеспеченность водой и концентрацией растворенных в ней веществ, сильно влияют на заложение всех органов, кроме ранее сформированных зачатков первич-

ной хвои, и на рост всей первичной хвои, включая и сформированные ранее [10]. Так, длина надземной части (табл. 3) контрольного варианта составила $(40,4 \pm 3,3)$ мм. Замачивание семян в растворе нанопорошка железа с концентрацией 0,001 % повысило этот показатель, и всхожесть составила $(45,7 \pm 2,7)$ мм (113 % к контролю). Увеличение концентрации нанопорошка

железа до 0,01 % способствовало росту надземной части до $(47,8 \pm 1,1)$ мм (118 % к контролю). Дальнейшее повышение концентрации нанопорошка снизило данный показатель. Использование стимуляторов роста (Агат-25К и Циркон, Р) не превысило лучший показатель со внесением нанопорошков железа.

Табл. 3. Влияние нанопорошка железа на биометрические параметры сеянцев сосны обыкновенной

Вариант опыта	Длина надземной части				Длина главного корня			
	Среднеарифметическое значение, мм	Процент к контролю	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %	Среднеарифметическое значение, мм	Процент к контролю	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Контроль	$(40,4 \pm 3,3)$	—	14,1	5,3	$(202,5 \pm 6,7)$	—	20,3	7,1
Нанопорошок Fe – 0,001-процентный раствор	$(45,7 \pm 2,7)$	113	15,5	6,2	$(161,4 \pm 2,3)$	80	16,9	6,4
Нанопорошок Fe – 0,01-процентный раствор	$(47,8 \pm 1,1)$	118	15,7	6,1	$(173,5 \pm 5,2)$	86	18,3	6,5
Нанопорошок Fe – 0,1-процентный раствор	$(45,2 \pm 0,7)$	112	15,4	5,2	$(152,0 \pm 4,7)$	75	23,5	7,2
Агат-25К	$(46,2 \pm 1,7)$	114	14,7	5,7	$(196,9 \pm 4,1)$	97	22,1	6,9
Циркон, Р	$(47,0 \pm 0,9)$	116	15,6	6,2	$(206,7 \pm 8,7)$	102	18,4	6,7

Длина главного корня (см. табл. 3) контрольного варианта составила $(202,5 \pm 6,7)$ мм. Применение нанопорошка Fe всех исследуемых вариантов снизило данный показатель. Снижение роста главного корня объясняется более высокой концентрацией воды, молекулы которой притягиваются ионами железа, и, как следствие, повышением концентрации водорастворимых форм питательных веществ. Использование стимуляторов роста (Агат-25К и Циркон, Р) увеличило длину главного корня до уровня контроля.

Результаты эксперимента, приве-

денные в табл. 3, показывают, что в вариантах с применением нанопорошка железа формируется более компактная корневая система, не снижающая линейный рост надземной части. Компактная форма корневой системы соответствует требованиям, предъявляемым к посадочному материалу сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и не ухудшает свойств посадочного материала.

Таким образом, лабораторный и полевой опыты показали высокую отзывчивость сосны обыкновенной на применение нанопорошка железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов, Д. В.** Использование ультрадисперсных металлов в сельскохозяйственном производстве / Д. В. Виноградов, Л. В. Потапова // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 3. – С. 37–39.
2. **Гродницкая, И. Д.** Влияние химических и биологических методов обработки на прорастание семян хвойных в питомниках / И. Д. Гродницкая // Хвойные бореальной зоны. – 2006. – № 1. – С. 137–144.
3. Интенсификация выращивания лесопосадочного материала / Под ред. А. Р. Родина. – М. : Агропромиздат, 1989. – 78 с.
4. **Калашникова, Е. А.** Теоретические и практические аспекты применения нанотехнологий при подготовке семян к посеву / Е. А. Калашникова, А. Р. Родин // Вестн. МГУЛ–Лесной вестник. – 2012. – № 7. – С. 65–66.
5. **Райкова, А. П.** Исследование влияния ультрадисперсных порошков металлов, полученных различными способами, на рост и развитие растений / А. П. Райкова, Л. А. Паничкин, Н. Н. Райкова // Нанотехнологии и информационные технологии XXI века. – 2006. – С. 69–72.
6. Рекомендации по использованию ультрадисперсных порошков металлов (УДПМ) в сельскохозяйственном производстве / Г. И. Чурилов [и др.] ; под общ. ред. С. Д. Полищук. – Рязань : РГАТУ, 2010. – 51 с.
7. **Родин, А. Р.** Использование высокоэффективных фиторегуляторов роста при выращивании посадочного материала / А. Р. Родин, Н. Я. Попова, Н. М. Стукушин // Вестн. МГУЛ–Лесной вестник. – 2000. – № 6. – С. 189–190.
8. **Трапезников, В. К.** Локальное питание растений / В. К. Трапезников, И. И. Иванов, Н. Г. Тальвинская. – Уфа : Гилем, 1999. – 260 с.
9. **Фадькин, Г. Н.** Изучение влияния нанокристаллических порошков металлов на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной / Г. Н. Фадькин // Юбилейный сб. науч. тр. студентов, аспирантов и преподавателей агроэкол. фак., посвящ. 110-летию со дня рождения проф. И. С. Травина. – 2010. – С. 158–161.
10. **Фирсов, Г. А.** Хвойные растения / Г. А. Фирсов. – М. : АСТ ; СПб. : Сова, 2005. – 95 с.
11. **Фолманис, Г. Э.** Активация прорастания семян ультрадисперсными порошками железа / Г. Э. Фолманис // Достижения науки и техники АПК. – 2001. – № 9. – С. 74–78.

Статья сдана в редакцию 21 января 2015 года

Геннадий Николаевич Фадькин, канд. с.-х. наук, доц., Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева. E-mail: g-fadkin@mail.ru.

Дмитрий Валериевич Виноградов, д-р биол. наук, проф., Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева. E-mail: vdv-rz@rambler.ru.

Александр Васильевич Щур, канд. с.-х. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: shchur@yandex.ru.

Gennady Nikolayevich Fadkin, PhD (Agriculture), Associate Prof., Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. E-mail: g-fadkin@mail.ru.

Dmitry Valeryevich Vinogradov, DSc (Biology), Prof., Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. E-mail: vdv-rz@rambler.ru.

Aleksandr Vasilyevich Shchur, PhD (Agriculture), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: shchur@yandex.ru.

ЭКОНОМИКА.
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 65.012.2(075.8)

Т. В. Пузанова, А. В. Крупкина

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ В МАЛОМ БИЗНЕСЕ**

UDC 65.012.2(075.8)

T. V. Puzanova, A. V. Krupkina

**AUTOMATION OF OPERATIONAL PRODUCTION PLANNING IN
SMALL-SCALE BUSINESS**

Аннотация

Рассмотрена методика составления оперативного плана для предприятия малого бизнеса с использованием разработанного программного продукта, описаны возможности инструмента, приведены входные и выходные формы, отражена специфика оперативно-производственного планирования для микроорганизации с позаказным характером производства.

Ключевые слова:

малый бизнес, позаказное производство, автоматизация, автоматизированное рабочее место, база данных, портфель заказов, сводная таблица, оперативный план.

Abstract

The methodology of drawing up an operational plan for small businesses using the developed software is discussed in the paper, the capabilities of the instrument are described, its input and output forms are given, the specifics of operational production planning for a micro organization with an order-based character of production are provided.

Key words:

small business, order-based production, automation, workstation, database, stock of orders, summary table, operation plan.

Как известно, внедрение автоматизированных систем управления требует больших затрат, которые окупаются при благоприятных обстоятельствах за 3...4 года. Для малых и небольших предприятий суммы, которые называются профессиональными разработчиками систем электронной обработки данных, просто неподъемны. В то же время потребность в автоматизации управления предприятием существует и

наиболее актуальна именно для малых и небольших предприятий, где численность плановиков и аналитиков очень ограничена либо они вообще отсутствуют [1]. Как для крупного, так и для малого бизнеса составление оперативных планов помогает принять правильное решение в конкретных рыночных условиях. У малого бизнеса не очень широкие возможности для маневров, поэтому от качества планирования за-

висит эффективность будущей деятельности.

Оперативно-производственное планирование производства играет главную роль в обеспечении своевременного выпуска и поставки продукции потребителям на основе рационального использования ограниченных экономических ресурсов в текущем периоде времени. Оно является средством последовательного выполнения тактических планов. Это обычная, ежедневная деятельность специалистов, которая позволяет выполнить тактические, а со временем, и стратегические задачи организации. Основная задача оперативных планов – это организация ежедневной деятельности работников предприятия и направление её в приоритетное русло целей и задач. Особенно важно оперативное планирование на начальном этапе бизнеса – во время быстрого развития или в работе над новым направлением деятельности.

Кроме этого, оперативное планирование обеспечивает контроль над работой персонала, получаемыми результатами, что повышает эффективность работы предприятия в целом.

В работе рассматривается предприятие малого бизнеса, специализирующееся на изготовлении одежды под заказ, для которого оперативно-производственное планирование является актуальной задачей. Позаказный характер и специфика производства обуславливают вид, содержание и способ составления оперативного плана на каждый день. Оперативный план должен наглядно предоставлять информацию о заказах, выполнение которых запланировано (артикул, наименование и размер изделия, фамилия заказчика, а также цвет ткани для данного изделия и трудоемкость его изготовления). Набор параметров необходим для более быстрого и полного восприятия информации как портными, так и менеджером по сбыту, поскольку у первых при изучении оперативного плана не должно воз-

никать трудностей с определением характера работы на день, а последний отвечает за отгрузку изготовленной продукции заказчиком и должен легко ориентироваться в портфеле заказов и оперативном плане.

Кроме того, в оперативном плане должна быть отражена стадия готовности, в которой находится каждый конкретный вид изделия. На данном предприятии существует необходимость в контроле трех этапов: заказ еще не передан на выполнение; заказ находится в состоянии незавершенного производства; заказ выполнен.

Самое главное требование, предъявляемое к оперативному плану, – это представление всех описанных ранее характеристик заказов в соответствии с их очередностью запуска в производство. Очередность должна формироваться с учетом даты поступления заказа, а также наличия определенного вида ткани, из которой должно быть изготовлено изделие. Так как позаказный характер производства предполагает возможность поступления срочного заказа, выполнение которого необходимо обеспечить в кратчайшие сроки, то возникает необходимость корректировки разработанных оперативных планов.

Решение задач оперативно-производственного планирования является ежедневной функцией менеджера рассматриваемого предприятия. Поэтому создание автоматизированного рабочего места (АРМ) менеджера позволяет повысить результативность и эффективность его работы, создаваемых оперативных планов, контролировать их выполнение и тем самым обеспечить эффективную работу предприятия [2]. Разработанный авторами программный продукт АРМ менеджера обеспечивает решение следующих задач:

- автоматизация процесса учета и формирования портфеля заказов, выступающего в качестве информационной базы для разработки оперативного плана;

- составление оперативного плана на основе сформированного портфеля заказов;
- оперативный учет состояния принятых заказов;
- формирование отчетной и аналитической информации необходимых форм.

Для создания АРМа был использован табличный процессор Microsoft Excel и язык программирования Visual Basic for Applications [3]. Причинами такого выбора являются следующие особенности:

- Microsoft Excel входит в состав Microsoft Office и на сегодняшний день является одним из наиболее популярных приложений в мире;
- Microsoft Excel предоставляет возможности для экономико-статистических расчетов, графические инструменты и язык макропрограммирования VBA;
- Microsoft Excel дает возможности для создания и использования реля-

ционных баз данных при решении экономических задач;

- для использования языка макропрограммирования VBA не требуется установки компилятора на компьютере пользователя, т. к. VBA встроен в среду MS Excel;
- в VBA реализованы основные концепции процедурного и объектно-ориентированного программирования;
- с помощью VBA можно легко и быстро создавать пользовательские приложения, используя единую для всех офисных программ среду и язык.

При построении АРМа использовался модульный принцип, что позволило при добавлении новых модулей к существующему программному коду расширить и изменить возможности АРМ и спектр решаемых с его помощью задач. Таким образом, программный продукт состоит из модулей, каждый из которых решает определенную задачу. Структура программы представлена на рис. 1.

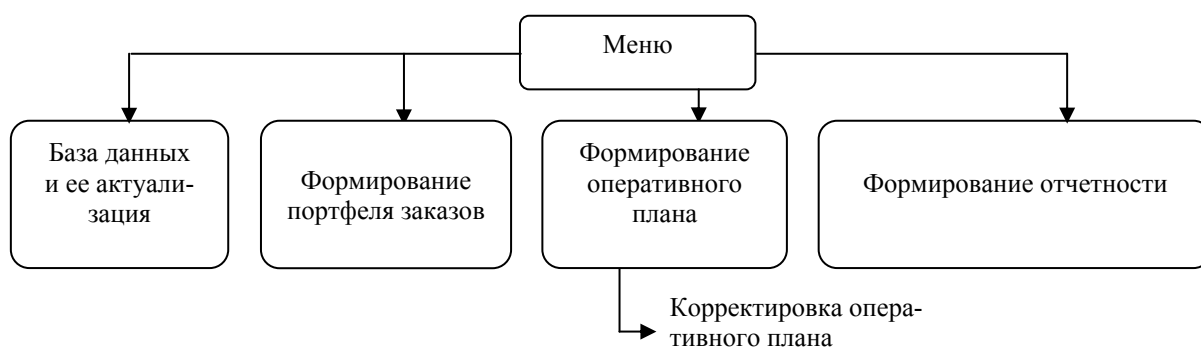


Рис. 1. Структура программного обеспечения

Работа программы требует выбора вида решаемой задачи, активизации соответствующего модуля с помощью меню и вызова необходимой пользовательской формы. Основой корректной работы программного продукта является актуализация базы данных, которую необходимо контролировать, обновлять и корректировать по мере появления новых клиентов, видов производимых

изделий, тканей и т. п.

Рассмотрим процесс оперативно-производственного планирования с применением АРМа менеджера. Исходная информация для формирования портфеля заказов может быть получена в процессе оформления заказов, который осуществляется в АРМе менеджера активизацией соответствующего модуля и вызовом необходимой пользователь-

ской формы. На основе портфеля заказов разрабатывается оперативный план, который является базой для построения сводной аналитической таблицы, необходимой для осуществления контроля и формирования отчетности.

Для оформления заказа используется входная форма (рис. 2), которая может вызываться как из главного меню, так и с рабочего листа Excel, где в табличной форме представлен портфель заказов.

Рис. 2. Входная форма оформления заказов

Верхняя строка заполняется автоматически при вызове формы, и в ней отображается дата, соответствующая текущей системной дате по системному календарю компьютера. Ниже расположен блок данных о клиенте. Поля «ФИО», «Адрес» и «Номер телефона» заполняются менеджером с помощью клавиатуры, а поле «Способ оплаты» представляет собой элемент с выбором одного из двух возможных вариантов: наложенный платеж или предоплата. Выбор сразу двух вариантов невозможен.

Далее следует блок данных о заказываемом изделии. Заполнение начинается с поля «Артикул». Как только это

поле будет заполнено и фокус перейдет на другой элемент управления, поля «Наименование» и «Цена» будут заполнены автоматически в соответствии с введенным артикулом. Данные для заполнения вышеуказанных полей содержатся в базе на отдельном рабочем листе MS Excel. Кроме этого, пользователю необходимо выбрать из списка «Размер» один из возможных вариантов, а также указать количество заказываемого изделия в соответствующем поле. Общая сумма рассчитывается автоматически при заполнении поля «Количество» еще до того, как будет получен фокус от другого элемента управления формы оформления заказа.

В правой части формы расположены четыре кнопки, которые выполняют различные действия. Так, кнопка «Выход» закрывает и выгружает открытую форму «Оформление заказа», кнопка «Очистить» отменяет все введенные данные во всех полях формы, кнопка «Отмена» удаляет с рабочего листа MS Excel, на котором содержатся принятые заказы, последний оформленный заказ. Последняя кнопка удобна в случае, если заказ неправильно оформлен и уже занесен в портфель заказов. Кнопка «Оформить» непосредственно заносит принятый заказ в портфель заказов.

Необходимо отметить, что при наличии хотя бы одного незаполненного поля на форме программа выдает сообщение об ошибке и заказ не будет записан в портфель заказов. Пример сообще-

ния об ошибке представлен на рис. 3.

На рабочий лист MS Excel «Заказы» записываются не только данные, заполненные на форме «Оформление заказа», но и дополнительные сведения, такие как категория (номенклатурная группа), к которой относится выбранное изделие; число, месяц и год, которые записываются в три отдельных столбца, при этом месяц записывается не только в виде порядкового номера, но и по наименованию. Информация о категории выбирается из базы данных в соответствии с введенным артикулом. Столбцы, содержащие все эти сведения, скрыты для того, чтобы сделать портфель заказов более удобным для восприятия и менее перегруженным информацией (рис. 4). Однако эти дополнительные сведения необходимы для формирования сводной аналитической таблицы.

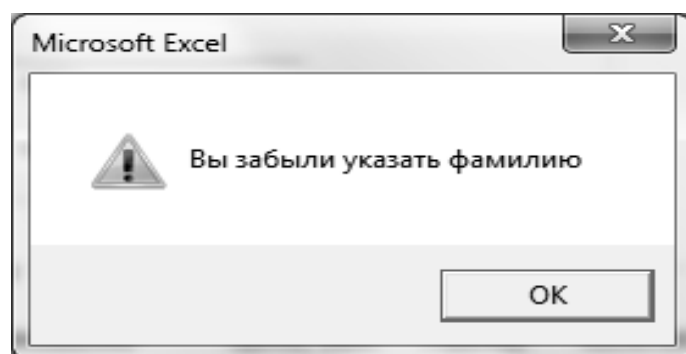


Рис. 3. Сообщение о незаполненном поле «ФИО»

	A	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O
1	Дата	ФИО	Адрес	Номер телефона	Арт	Наименование	Размер	Кол-во	Сумма	Способ оплаты	Статус
2	03.06.2013	Мороз Ольга Александровна	220094 г. Минс	-	30.7.3	Блузка желтая с принтом	46	1	270000	наложенный платеж	В обработке
3	04.06.2013	Куракова Ирина Александровна	220012 г. Минс	-	120.6.3	Комплект для дома салатовый	46	1	190000	наложенный платеж	В обработке
4	04.06.2013	Шатов Алексей Николаевич	247210 г. Жлобин	-	120.6.6	Комплект черные колечки на бел	42	1	225000	предоплата	В обработке
5	05.06.2013	Алборова Оксана Викторовна	220043 Минск	-	130.6.4	Джемпер трехцветный	46	1	190000	предоплата	В обработке
6	05.06.2013	Алборова Оксана Викторовна	220043 Минск	-	30.7.5	Блузка абстракция	46	1	180000	предоплата	В обработке
7	05.06.2013	Алборова Оксана Викторовна	220043 Минск	-	70.7.4	Футболка желтая	46	1	147000	предоплата	В обработке
8	06.06.2013	Кабак Ольга Викторовна	222301 Минск	-	70.7.3	Футболка темно-серая	50	1	147000	наложенный платеж	

Рис. 4. Выходная форма, отражающая портфель заказов

Рассмотрим методику составления оперативного плана с помощью АРМа. В модуле формирования оперативного плана осуществляется определение очередности запуска выполнения заказов в производство и потребности в материальных ресурсах на основе сформированного портфеля заказов, который постоянно пополняется новыми заказами.

В АРМе реализованы два варианта составления плана очередности запуска принятых заказов в производство, отличающиеся принципом отбора заказов для оперативного плана. Принцип действия первого способа можно сравнить с методом бухгалтерского учета товарно-материальных ценностей FIFO: First In, First Out – первым пришёл – первым ушёл. Применительно к случаю обра-

ботки заказов в предложенном программном продукте этот принцип будет формулироваться следующим образом: первым принят – первым включен в план. В этом случае менеджеру необходимо определить количество единиц изделий, которые необходимо произвести в планируемом периоде, используя входную форму, представленную на рис. 5.

При нажатии на кнопку «Далее» входной формы на листе MS Excel «Оперативный план» пользователю будет представлен план очередности запуска в производство заказов, при формировании которого программа отбирает указанное количество заказов в соответствии с датой размещения и сортирует их по виду ткани (рис. 6).

Рис. 5. Окно ввода данных для составления оперативного плана

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Оперативный план на		08.11.2013	Количество работников - 1					
2									
3	Очередность	Арт.	Наименование	Размер	Цвет	ФИО клиента	Трудоемкость	Статус	
4	1	70.5.1	Футболка белая	42	белый	Панфилова Ольга Сергеевна	0,667		
5	2	30.7.7	Блузка битое стекло	48	битое стекло	Станкевич Светлана Анатольевна	1		
6	3	50.6.4	Платье брусничное с удлинень	42	брусничный	Панфилова Ольга Сергеевна	1,667		
7	4	30.7.3	Блузка желтая с принтом	46	желтый	Мороз Ольга Александровна	0,6665	НЗП	
8	5	120.6.6	Комплект черные колечки на бе	42	колечки черн	Шатов Алексей Николаевич	0,7085	НЗП	
9	6	80.5.7	Топ оранжевый с завязкой	44	оранжевый	Ларина Ирина Вадимовна	0,75		
10	7	50.5.3	Платье салатное на завязках	42	салатовый	Панфилова Ольга Сергеевна	1,333		
11	8	50.5.13	Платье черное с завязками	46	черный	Ларина Ирина Вадимовна	1,333		

Рис. 6. Пример плана очередности запуска в обработку заказов

Такая сортировка необходима для оптимизации раскроя, обеспечивающей увеличение коэффициента использования ткани. Следует отметить, что в первую очередь в оперативный план добавляются изделия и заказы, находящиеся в состоянии незавершенного производства, т. е. со статусом «НЗП».

При этом менеджеру для более удобного восприятия, а также для упрощения дальнейшего отслеживания хода выполнения заказа на результирующий лист выводятся фамилия, имя и отчество клиента.

Если суммарная трудоемкость запланированного количества изделий превышает плановый период, то количество изделий, попавших в оперативный план, автоматически корректируется соответствующим образом.

Однако при позаказном производстве может возникнуть необходимость выполнения в первую очередь только что поступившего заказа. Поэтому в соответствии со спецификой работы исследуемого предприятия малого бизнеса в созданном инструменте для оперативно-производственного планирования

была предусмотрена возможность корректировки менеджером в случае необходимости составленного оперативного плана при поступлении срочного заказа. Это второй возможный способ составления плана, аналогичный методу бухгалтерского учета товарно-материальных ценностей LIFO: Last In, First Out – последним пришёл – первым ушёл. Применительно к разработке оперативного плана по принятым заказам этот принцип будет формулироваться следующим образом: последним принят – первым включен в план.

Корректировка оперативного плана осуществляется с применением кнопки «Добавить заказ в план», расположенной на листе MS Excel «Оперативный план». При этом менеджер использует форму для выбора клиента, чей заказ необходимо добавить в план. В соответствии с выбранной фамилией клиента в выпадающем списке с данными по заказу будут представлены артикулы и наименования заказанных им изделий, как представлено на рис. 7.

Рис. 7. Пользовательская форма для добавления заказа в оперативный план

После выбора клиента и заказанных им изделий пользователь использует кнопку «Добавить в план», и скорректированный план очередности запуска в производство поступивших заказов будет получен на результирующем листе MS Excel «Оперативный план» с обязательной сортировкой в соответствии с видом ткани. При этом из оперативного плана будут удалены один или несколько заказов, поступивших ранее срочных заказов для того, чтобы соблюдалось условие соответствия суммарной трудоемкости плановому периоду.

Независимо от варианта формирования оперативного плана на листе MS Excel «Заказы» напротив включенного в план заказа в столбце «Статус» будет указано «В обработке», и этот заказ в дальнейшем при планировании рассматриваться не будет, что исключает возможность попадания при корректировке одного и того же заказа несколько раз в обработку. Для исключенного из плана заказа и соответствующего клиента в столбце «Статус» будет удалена

запись «В обработке», и заказ будет учтен в следующем оперативном плане.

Планирование как важнейшая задача менеджмента требует обязательного контроля и анализа полученных результатов для своевременного принятия управленческих решений. С целью получения различных аналитических выборок в АРМе менеджера применяется сводная таблица. Сводная таблица (Pivot Table) – это пользовательский интерфейс для отображения многомерных данных на основе группировки, сортировки, фильтрации и изменения расположения данных. Обновление отчета производится простыми средствами пользовательского интерфейса, данные автоматически агрегируются по заданным правилам, при этом не требуется дополнительный или повторный ввод какой-либо информации.

В сводной таблице, реализованной в данном программном продукте (рис. 8), указываются фамилия, имя и отчество клиента, артикулы и наименования изделий, заказанные им; в столбцах – год, месяц и число.

Сумма по полю Сумм	Год	Месяц	Дата	Общий итог
	2013			
	июнь	июль	август	сентябрь
ФИО	Арт	Наименс		
Мороз Ольга Александровна	270 000			270 000
Куракова Ирина Александровна	190 000			190 000
Шатов Алексей Николаевич	225 000			225 000
Алборова Оксана Викторовна	517 000			517 000
Кабак Ольга Викторовна	147 000			147 000
Лустова Ольга Викторовна	105 000			105 000
Ханыкова Алла Михайловна	170 000			170 000
Станкевич Светлана Анатольевна	175 000			175 000
Ларина Ирина Вадимовна	336 000			336 000
Панфилова Ольга Сергеевна	890 000	630 000		1 520 000
Стебенева Евгения Александровна	235 000			235 000
Рогалевиц Анастасия Владимировна	528 000			528 000
Ровенько Екатерина Вячеславовна	225 000			225 000

Рис. 8. Выходная форма со сводной таблицей

В качестве значений, отображаемых в сводной таблице, используются данные о сумме заказа каждого клиента. Таким образом, создается информативная аналитическая таблица, в которой представлены данные о сумме и содержании (артикул и наименование изделий) заказов каждого клиента, сгруппированных по месяцам и годам.

На основе сводной таблицы можно проводить анализ следующих показателей:

- общей суммы заказов клиента за интересующий период времени;
- выручки за определенный промежуток времени (день, месяц или год);
- суммы реализации по каждой категории (номенклатурной группе) в стоимостном выражении (рис. 9);

– количества клиентов, выбравших способ оплаты «наложенный платеж», а также суммы денежных средств, поступившей через этот способ оплаты;

– количества клиентов, выбравших способ оплаты «предоплата», а также суммы денежных средств, поступившей через этот способ оплаты (рис. 10);

– количества клиентов, чьи заказы находятся в обработке, а также артикулов и наименований изделий, заказанных этими клиентами;

– количества клиентов, чьи заказы еще не поступили в обработку, а также артикулов и наименований изделий, заказанных этими клиентами и др.

	A	B	C	D	E	F
1						
2	Способ оплаты	(Все)				
3	Статус	(Все)				
4						
5	Сумма по полю Сумма	Год	Месяц	Дата		
6		2013				Общий итог
7		июнь	июль	август	сентябрь	
8	Категория					
9	блузки, кардиганы	3 109 000	515 000	1 563 000	1 314 000	6 501 000
10	брюки, леггинсы, юбки	1 700 000	476 000	547 000		2 723 000
11	водолазки, толстовки	685 000	475 000	1 449 000	1 875 000	4 484 000
12	одежда для дома	1 260 000	450 000	1 065 000	743 000	3 518 000
13	платья	2 480 000	320 000	1 265 000	1 885 000	5 950 000
14	футболки, топы	3 105 000	426 000	448 000		3 979 000
15	слинги	325 000		345 000		670 000
16	Общий итог	12 664 000	2 662 000	6 682 000	5 817 000	27 825 000

Список полей сводной таблицы

Выберите поля для добавления в отчет:

- ☒ Месяц
- ☒ Год
- ☐ ФИО
- ☐ Адрес
- ☐ Номер телефона
- ☐ Арт

Перетащите поля между указанными ниже областями:

☒ Фильтр отчета ☒ Названия столбцов
☐ Названия строк ☒ Значения

☐ Отложить обновление макета Обновить

Рис. 9. Выходная форма с отчетом реализации по номенклатурным группам

	A	B	C	D	E	F
1						
2	Способ оплаты	предоплата				
3	Статус	(Все)				
4						
5	Сумма по полю Сумма	Год	Месяц	Дата		
6		2013				Общий итог
7		июнь	июль	август	сентябрь	
8	ФИО					
9	Алборова Оксана Викторовна	517 000				517 000
10	Байдакова Евгения Геннадьевна				534 000	534 000
11	Бакаленко Наталья Ивановна	200 000				200 000
12	Бирючинских Анастасия Игоревна				270 000	270 000
13	Денисенко Светлана Михайловна	317 000				317 000
14	Елсакова Юлия Сергеевна	225 000				225 000
15	Коминч Наталья Анатольевна		522 000		345 000	867 000
16	Крикливый Михаил Вадимович			510 000		510 000
17	Куприянчик Татьяна Владимировна	274 000				274 000
18	Ларина Ирина Вадимовна	336 000				336 000
19	Лисовская Марина Владимировна		207 000			207 000
20	Наукович Екатерина Александровна				170 000	170 000
21	Панфилова Ольга Сергеевна	890 000	630 000			1 520 000
22	Полонейчик Ирина Юрьевна			413 000		413 000
23	Прокопук Наталья Петровна			1 022 000		1 022 000
24	Сарычева Наталья Васильевна	325 000				325 000
25	Седая Жанна Григорьевна			1 523 000		1 523 000
26	Станкевич Светлана Анатольевна	175 000				175 000
27	Стрелец Екатерина Васильевна				225 000	225 000
28	Татаринова Татьяна Григорьевна		509 000			509 000
29	Трибуль Наталия Валерьевна				846 000	846 000
30	Холодинская Ольга Игоревна			160 000		160 000
31	Шатов Алексей Николаевич	225 000				225 000
32	Шведовский Дмитрий Александрович	961 000				961 000
33	Яцевич Юлия Васильевна	721 000				721 000
34	Общий итог	5 166 000	1 868 000	3 628 000	2 390 000	13 052 000

Рис. 10. Выходная форма с отчетом о клиентах, выбравших в качестве способа оплаты предоплату

Сводная таблица Excel предназначена для анализа данных без возможности редактирования информации. Поскольку разработанный АРМ доступен разным категориям работников, защита от изменений позволит сохранить информацию в первоначальном виде, повысив тем самым точность и качество управленческих решений, принятых на основе анализа сводной таблицы.

На базе анализа портфеля заказов за отчетный период и прогнозирования спроса формируется производственная программа на плановый период и с использованием встроенной в MS Excel надстройки «Поиск решения» осуществляется её оптимизация.

Разработанный АРМ менеджера внедрен и используется на малом предприятии по изготовлению одежды под заказ. Программный продукт является инвариантным и может быть использован не только на предприятии данной сферы деятельности. Его можно рассматривать в качестве универсального инструмента менеджера для любых фирм, работающих по заказам. Применение АРМа требует создания оригинальной базы данных с атрибутами производимых товаров или оказываемых услуг, поскольку именно она служит основой формирования портфеля заказов и составления оперативных планов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузин, Б. И.** Методы и модели управления фирмой / Б. И. Кузин, В. Н. Юрьев, Г. М. Шахдинаров. – СПб. : Питер, 2001. – 432 с.
2. **Плакунов, М. К.** Планирование на малых и средних предприятиях средствами EXCEL / М. К. Плакунов. – СПб. : Питер, 2004. – 156 с.
3. **Сингаевская, Г. И.** Функции в EXCEL. Решение практических задач / Г. И. Сингаевская. – М. : Вильямс, 2005. – 880 с.
4. **Чечевицына, Л. Н.** Экономика фирмы : учеб. пособие для студентов вузов / Л. Н. Чечевицына, И. Н. Чуев. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. – 400 с.

Статья сдана в редакцию 17 февраля 2015 года

Татьяна Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-296-63-17-35.

Алина Вячеславовна Крупкина, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Tatyana Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Phone: +375-296-63-17-35.

Alina Vyacheslavovna Krupkina, Master's degree student, Belarusian-Russian University.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2(47) 2015

Ответственный за выпуск

В. И. Кошелева

Оформление обложки

Е. С. Фитцова

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр. Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212000, г. Могилев. Телефон: 26-61-00, 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 28.05.2015. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 18,13. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 100 экз. Заказ 2953.

УПКП «Могилевская областная укрупненная типография
имени Спиридона Соболя»

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий:

№ 1/116 от 17.12.2013,

№ 2/24 от 12.12.2013.

Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев, Республика Беларусь