

НАУКА и ТЕХНИКА

**Международный
научно-технический журнал**



**Science
& Technique** 5/2015
**International
Science & Technique Journal**

Серия 1. Машиностроение
Серия 6. Экономика промышленности

Series 1. Mechanical Engineering
Series 6. Economy in Industry

Издается с января 2002 года
Периодичность издания – один раз в два месяца

Published since January 2002
Publication frequency – bi-monthly

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Founder

Belarussian National
Technical University

Главный редактор

Борис Михайлович Хрусталеv

Editor-in-Chief

Boris M. Khroustalev

Редакционная коллегия

А. С. Калиниченко (*заместитель главного редактора*),
В. В. Бабицкий, В. Г. Баштовой, А. В. Белый, В. П. Бойков,
С. В. Босаков, Ю. В. Василевич, О. Г. Девойно,
К. В. Доброго, П. И. Дячек, М. З. Згуровский (*Украина*),
Р. Б. Ивуть, М. Г. Киселев, В. М. Константинов, Я. Н. Ковалев,
В. В. Козловский, Н. В. Кулешов, С. Н. Леонович,
С. А. Маскевич, Э. И. Михневич,
Нгуен Тху Нга (*Вьетнам*), М. Опеляк (*Польша*),
О. Г. Пенязьков, Г. А. Потаев, О. П. Реут, Ф. А. Романюк,
И. И. Сергей, В. Л. Соломахо, С. А. Чижик, А. Н. Чичко,
В. К. Шелег, И. Эберхардштайнер (*Австрия*),
Б. А. Якимович (*Россия*)

Editorial Board

A. S. Kalinichenko (*Deputy Editor-in-Chief*),
V. V. Babitsky, V. G. Bashtovoi, A. V. Belyi, V. P. Boikov,
S. V. Bosakov, Yu. V. Vasilevich, O. G. Devoyno,
K. V. Dobrego, P. I. Diachek, M. Z. Zgurovsky (*Ukraine*),
R. B. Ivut, M. G. Kiselev, V. M. Konstantinov, Ya. N. Kovalev,
V. V. Kozlovsky, N. V. Kuleshov, S. N. Leonovich,
S. A. Maskevich, E. I. Mikhnevich,
Nguyen Thuy Nga (*Vietnam*), M. Opelyak (*Poland*),
O. G. Peniazkov, G. A. Potaev, O. P. Reut, F. A. Romaniuk,
I. I. Sergei, V. L. Solomakho, S. A. Chizhik, A. N. Chichko,
V. K. Sheleg, J. Eberhardsteiner (*Austria*),
B. A. Yakimovich (*Russia*)

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

Киселев М. Г., Дроздов А. В., Монич С. Г., Богдан П. С.	
Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них	3
Василевич Ю. В., Довнар С. С.	
Анализ резонансного поведения несущей системы крупногабаритного станка типа «подвижная стойка»	10
Котлобай А. Я., Котлобай А. А., Юнусов Ю. Ш., Тамело В. Ф.	
Развитие систем приводов рабочего оборудования инженерной техники	18
Оковитый В. В.	
Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий	26
Мойсейчик А. Е., Василевич Ю. В.	
Теплообразование и сопротивление деформированию конструкционной стали	33
Нурминский Е. А., Пугачев И. Н., Шамрай Н. Б., Седюкевич В. Н.	
Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей ..	39

CONTENTS

Mechanical Engineering

Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Bogdan P. S.	
Influence of Self-Tapping Screw Electro-Arc Machining on its Twisting-In in Specimens Made of Various Materials and Twisting-Out Procedure	3
Vasilevich Yu. V., Dovnar S. S.	
Resonance Behaviour Analysis of Carrying System in Heavy Machine with Traveling-Column	10
Kotlobai A. Ja, Kotlobai A. A., Yunusov Yu. Sh., Tamelo V. F.	
Development of Operating Drive Systems in Engineering Equipment	18
Okovity V. V.	
Selection of Oxides for Stabilization of Zirconium Dioxide While Obtaining Thermal Barrier Coatings	26
Moyseychik A. E., Vasilevich Yu. V.	
Heat Generation and Resistance to Deformation of Structural Steel	33
Nurminskiy E. A., Pugachev I. N., Shamray N. B., Sedyukevich V. N.	
Determination of Passenger-Traffic Flows in Regional Transport System on the Basis of Modified Gravity Models	39

Капский Д. В., Пегин П. А. Методика прогнозирования аварийности по методу конфликтных зон в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» на основе моделей движения на регулируемом перекрестке	46	Kapsky D. V., Pegin P. A. Accident Prediction Methodology Using Conflict Zone Method for “Transit Transport – Pedestrian” Conflict Situation and Models of Traffic Flows at Controlled Intersection	46
Карпунин И. И., Кузьмич В. В., Балабанова Т. Ф. Классификация биологически разлагаемых полимеров	53	Karpunin I. I., Kuzmich V. V., Balabanova T. F. Classification of Biodegradable Polymers	53
Григорова Т. М. Вопросы оптимизации транспортных систем пригородного сообщения	59	Grigorova T. M. Optimization Problems on Suburban Transport Systems	59
Шматок Е. В., Остриков О. М. Метод расчета полей смещений и напряжений в системе параллельных линзовидных механических двойников, возникающих в мартенситной фазе магнитного сплава Ni ₂ MnGa, обладающего свойством запоминания формы . . .	63	Shmatok E. V., Ostrikov O. M. Method For Calculation of Displacement Fields and Stresses in System of Parallel Lenticular Mechanical Twins Occurring in Martensitic Phase of Ni ₂ MnGa-Magnetic Alloy Having Property of Shape Memory	63
Старосотников Н. О., Фёдорцев Р. В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками	71	Starasotnikau M. A., Feodortsau R. V. Estimation of Accurate Determination for Coordinates of Gravity Energy Center in Collimator Test-Object in Respect of Control Schemes for Optoelectronic Devices with Matrix Photodetectors	71
Экономика промышленности		Economy in Industry	
Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах (Часть 2)	77	Romaniuk V. N., Muslina D. B. Forecasting of Production Output for Light Industry Enterprises with Purpose to Determine their Power Resources Requirements (Part 2)	77

Ответственный секретарь редакции
В. Н. Гурьянчик

Executive Secretary of Editorial Staff
V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

Address

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Belarussian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Тел. +375 17 292-65-14

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

E-mail: sat@bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 09.09.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

УДК 621.792.4

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ САМОРЕЗА НА УСЛОВИЯ ЕГО ВКРУЧИВАНИЯ В ОБРАЗЦЫ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫКРУЧИВАНИЯ ИЗ НИХ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ДРОЗДОВ А. В.,
аспиранты МОНИЧ С. Г., БОГДАН П. С.*

Белорусский национальный технический университет

E-mail: dav7@tut.by

Дана экспериментальная оценка влияния электроконтактной обработки поверхности стального самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них. Изложены основные положения методики проведения исследований, включая описание технологической схемы электроконтактной обработки поверхности саморезов и примененных в ходе выполнения экспериментов образцов, а также аппаратно-измерительных средств, с помощью которых осуществляли фиксирование крутящего момента, приложенного к саморезу при его вкручивании в материал образца и выкручивании из него. Установлено, что в результате электроконтактной обработки на поверхности самореза формируются лунки (углубления), имеющие по краям наплывы застывшего металла, которые придают ей режущую способность и оказывают тем самым влияние на условия ее взаимодействия с поверхностью образца в процессе вкручивания в него самореза и выкручивания из него.

Приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на процесс его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них. В частности, установлено, что при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью величина прикладываемого к нему крутящего момента при вкручивании в образец оказывается меньше, чем у самореза в исходном состоянии его поверхности, а при выкручивании из него, наоборот, она больше. При этом с повышением твердости материала образца разность между указанными значениями крутящего момента возрастает.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, стальной саморез, вкручивание, выкручивание, образец.

Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

INFLUENCE OF SELF-TAPPING SCREW ELECTRO-ARC MACHINING ON ITS TWISTING-IN IN SPECIMENS MADE OF VARIOUS MATERIALS AND TWISTING-OUT PROCEDURE

KISELEV M. G., DROZDOV A. V., MONICH S. G., BOGDAN P. S.

Belarusian National Technical University

The paper provides an experimental evaluation pertaining to the influence of steel self-tapping screw on its twisting-in specimens made of various materials and its twisting-out process. Main principles of the investigation methodology including description of technological scheme of self-tapping screw electro-arc machining and specimens applied while executing the experiments and hardware measuring tools used for fixation of torque which has been applied to the self-tapping screw during its twisting-in in the specimen and its twisting-out process have been presented in the paper. It has been established that the self-tapping screw electro-arc machining initiates formation of dimples (holes) which have solidified metal flows along their edges. The flows give a cutting ability to the screw and so they exert an influence on the conditions of screw's interaction with the specimen during its twisting-in and twisting-out processes.

The paper presents results of experimental investigations that demonstrate an impact of self-tapping screw electro-arc machining on its twisting-in in the specimens made of various materials and twisting-out procedure. In particular, it has been ascertained that torque value applied to the self-tapping screw with modified surface during twisting-in process is less in comparison with the self-tapping screw having an initial state of its surface and in the case of its twisting-out process the value is higher. In this respect difference between the indicated torque values is increasing when material hardness of the specimen becomes higher.

Keywords: electro-arc machining, steel self-tapping screw, twisting-in, twisting-out, specimen.

Fig. 5. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Саморезы представляют собой крепежные детали, которые широко применяются в самых различных отраслях промышленности, строительстве и медицине. В последнем случае они выполняются в виде винтовых стоматологических имплантатов, которые вкручиваются в челюстную костную ткань и служат в качестве опоры для протезов зубов [1–5].

Как показали результаты исследований [6–10], путем электроконтактной обработки (ЭКО) исходной (гладкой) металлической поверхности ей можно придать режущую способность. Достигается это за счет формирования на ней под действием электрической эрозии характерных лунок, имеющих по краям наплывы затвердевшего металла, выходящие за исходный контур обработанной поверхности. Эти наплывы с весьма развитой поверхностью выполняют роль своеобразных режущих элементов, способных снимать стружку с материалов, имеющих меньшую, чем металл наплывов, твердость. Эффективность ЭКО поверхности с целью придания ей режущей способности была экспериментально подтверждена при изготовлении инструментов проволочного и ленточного типов [4]. Вместе с тем, сегодня отсутствуют сведения по применению такой обработки с целью модификации поверхностей других видов, в частности цилиндрических сферических и винтовых, которые широко используются в качестве как рабочих поверхностей инструментов (зубные боры с цилиндрической и сферической головками), так и крепежных (фиксирующих) деталей, к примеру саморезов.

В этой связи цель исследований авторов заключалась в экспериментальной оценке влияния режимов предварительной электроконтактной обработки резьбовой поверхности саморезов на процесс их последующего закрепления в образцах из различных материалов.

Методика проведения исследований. В качестве испытуемых образцов использовали строительные саморезы марки СГМ 4,8-50, изготовленные из стали 08кп (ГОСТ 1050–88). Технологическая схема выполнения ЭКО рабочей поверхности образцов представлена на рис. 1.

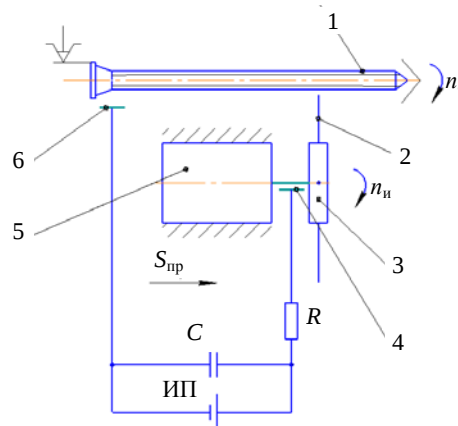


Рис. 1. Технологическая схема ЭКО поверхности самореза с использованием проволочного электрода-инструмента: 1 – обрабатываемый саморез; 2 – электрод-инструмент; 3 – оправка; 4, 6 – токосъемное устройство; 5 – электродвигатель постоянного тока; $S_{пр}$ – продольная подача; R – токоограничивающий резистор; C – накопительный конденсатор; ИП – источник питания постоянного тока

Обрабатываемый саморез своей головкой закреплялся в трехкулачковом патроне настольного токарного станка ТВ-4, а с противоположной стороны поддерживался обратным центром. От привода станка ему сообщалось вращательное движение с регулируемой частотой n_c . На поперечном суппорте станка монтировали электродвигатель постоянного тока (МН-145А), электрически от него изолированный. На валу электродвигателя устанавливали оправку, в которой равномерно по окружности консольно закрепляли четыре проволочных (сталь 45) электрода-инструмента диаметром 0,45 мм и свободной длиной 30,00 мм. Предварительно за счет регулировочных перемещений поперечного суппорта станка электродвигатель устанавливали в положение, при котором обеспечивалось периодическое контактирование вращающихся с частотой $n_и$ проволочных инструментов с обрабатываемой поверхностью самореза. С помощью токосъемных устройств эти элементы включали в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока, накопительного конденсатора и токоограничивающего резистора. Во всех экспериментах использовали прямую полярность, т. е. анодом являлся обрабатываемый саморез. В результате периодического прерывания электрической цепи в месте его контактирования с проволочными инструментами возникали

электрические разряды, вызывающие электрическую эрозию рабочей поверхности самореза с формированием на ней характерных лунок. Для осуществления ЭКО по всей длине самореза продольному суппорту станка сообщали продольную подачу, величина которой на оборот соответствовала шагу резьбы самореза и составляла 2,5 мм/об.

При постоянной скорости вращения самореза за счет изменения частоты вращения проволочных инструментов обеспечивался различный характер расположения лунок на его поверхности, т. е. без их перекрытия и с перекрытием. ЭКО рабочей поверхности самореза осуществляли на воздухе, а в другой – с применением диэлектрической жидкости – дистиллированной воды, которую капельно подавали в зону обработки.

После ЭКО рабочей поверхности саморезов с помощью микрометра проводили измерения их диаметральных размеров по длине в трех сечениях; результаты их сравнивали с аналогичными параметрами у саморезов в исходном состоянии. На основании сопоставления этих данных оценивали влияние условий и режимов ЭКО на изменение диаметра саморезов, а также на высоту образовавшихся на его поверхности наплывов металла.

Для исследования характера следов на поверхности образца, оставленных саморезом при его вкручивании, использовали следующую методику. Образец в этом случае выполняли в виде двух половин с хорошо обработанными контактными поверхностями, которые с помощью тисков плотно сжимали между собой. В таком положении образца в него по линии соединения его составных частей с помощью шуруповерта вворачивали испытуемый саморез. После этого тиски разжимали, образец разбирали на две части, а оставшийся в одной из них саморез аккуратно извлекали. Затем с помощью микроскопа исследовали на образце состояние следов, оставленных саморезом при его вкручивании.

Отдельная серия экспериментов была посвящена изучению влияния ЭКО поверхности саморезов на условия их закрепления в образцах из различных материалов: дерево (сосна и дуб), текстолит, оргстекло и кость. Для оценки величины крутящего момента, прилагаемого к саморезу при его вкручивании в образец и

выкручивании из него, использовали аккумуляторный шуруповерт SKIL 23.95 с крестообразной битой. Предварительно в его электрическую цепь в качестве датчика тока включали низкоомный резистор, сигнал с которого поступал на графопостроитель Endim 622.01, где фиксировался на бумажном носителе. Процедура этих измерений включала в себя последовательное выполнение действий. Вначале на бумажном носителе записывалась нулевая линия, т. е. в отсутствие сигнала в электрической цепи. Затем включали шуруповерт без нагрузки (холостой ход) и на том же носителе записывали сигнал с датчика тока, соответствующий данному режиму работы. После этого в намеченном с помощью шила месте на поверхности образца производили вкручивание испытуемого самореза с записью графика изменения тока нагрузки. Аналогичным образом фиксировали изменение тока нагрузки на двигателе шуруповерта при выкручивании самореза. При вкручивании самореза в образцы из дуба, текстолита и органического стекла в них предварительно просверливали отверстие диаметром 2,5 мм. В качестве примера на рис. 2 приведен график изменения тока нагрузки двигателя шуруповерта при вкручивании самореза в образец из сосны и выкручивании из него.

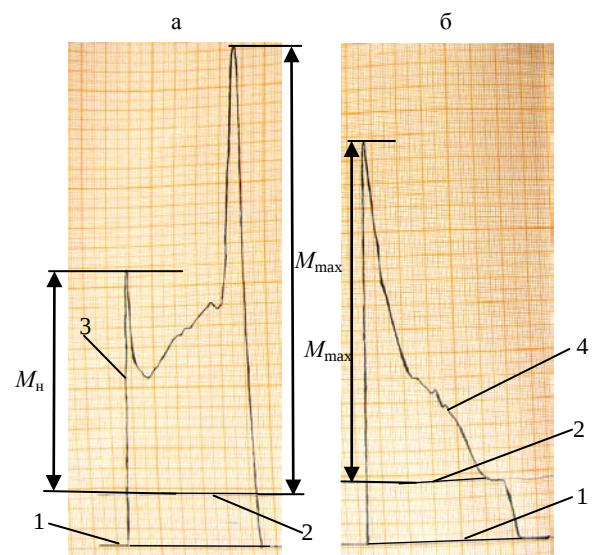


Рис. 2. График изменения тока нагрузки двигателя шуруповерта за время вкручивания самореза в образец из сосны (а) и выкручивания из него (б): 1 – нулевая линия; 2 – линия, соответствующая работе двигателя шуруповерта без нагрузки; 3, 4 – то же вкручиванию самореза и его выкручиванию

Учитывая, что измеряемый ток нагрузки двигателя шуруповерта пропорционален крутящему моменту $M_{кр}$, прикладываемому к саморезу при его вкручивании в материал образца и выкручивании из него, на полученных графиках (рис. 2) приняты следующие обозначения: M_n – крутящий момент, соответствующий началу движения самореза относительно материала образца при его вкручивании и выкручивании; M_{max} – максимальное значение момента сил при вкручивании и выкручивании самореза.

Результаты исследований и их обсуждение. Фотографии самореза в исходном состоянии его поверхности и после ее ЭКО представлены на рис. 3. В последнем случае на поверхности самореза в результате электрической эрозии сформированы углубления (лунки), которые имеют по краям наплывы застывшего металла, выходящие за исходный контур поверхности и тем самым придающие ей режущую способность. С повышением энергии электрического разряда, в частности напряжения U на накопительном конденсаторе, размер указанных лунок возрастает с одновременным увеличением высоты наплывов металла по их краям.

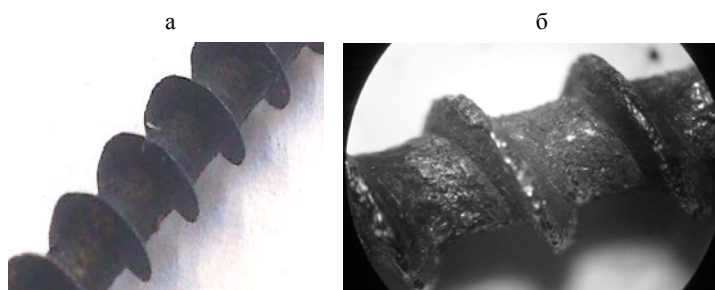
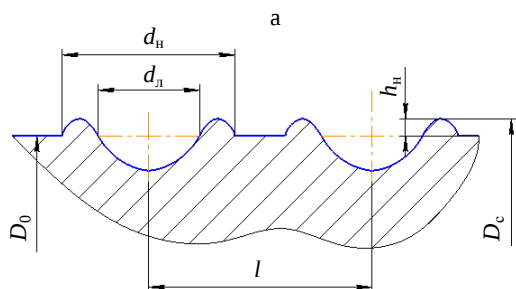


Рис. 3. Фотография поверхности самореза в исходном состоянии его поверхности (а) и после ее электроконтактной обработки (б)

Как показали результаты измерений диаметров саморезов, приведенные в табл. 1, при



неизменном значении $U = 75$ В в зависимости от коэффициента перекрытия лунок при выполнении операции ЭКО может происходить как их увеличение, так и уменьшение по сравнению со значением диаметра самореза в исходном состоянии его поверхности.

Таблица 1

Значения диаметров самореза в трех сечениях по его длине, соответствующие исходному состоянию поверхности и после ее ЭКО при различных значениях коэффициента перекрытия лунок k_l

Положение сечения измеряемого диаметра самореза по его длине, мм	Диаметр самореза, мм		
	В исходном состоянии	После ЭКО	
		при $k_l > 1$	при $k_l < 1$
10	4,88	4,80	5,03
25	4,87	4,82	4,98
40	4,84	4,80	4,95

Из приведенных экспериментальных данных следует, что выполнение ЭКО при $k_l < 1$ приводит к увеличению диаметров саморезов по сравнению с их исходными значениями, а при $k_l > 1$ имеет место уменьшение диаметров. Для объяснения этого обратимся к схеме (рис. 4) расположения сечений лунок, формируемых на поверхности при ее ЭКО при различных значениях коэффициента k_l .

В отличие от традиционно используемого коэффициента перекрытия лунок, значение которого определяется отношением диаметра лунок d_l к расстоянию l между центрами соседних лунок, в рассматриваемом случае в числителе следует использовать величину диаметра наплывов металла по краям лунок d_n . Тогда при $k_l = d_n/l < 1$ за счет образовавшихся вокруг лунок наплывов металла высотой h_n диаметр самореза D_c увеличивается по сравнению с его исходным значением D_0 на величину $2h_n$.

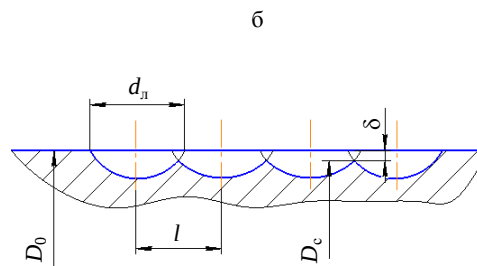


Рис. 4. Схема расположения сечений лунок на плоской поверхности при ее ЭКО с $k_l < 1$ (а) и $k_l > 1$ (б)

В случае, когда имеет место перекрытие лунок ($k_{\text{л}} > 1$), образовавшиеся на предыдущей лунке наплывы металла удаляются в процессе формирования последующей лунки, в результате чего диаметр наружной поверхности самореза D_c становится меньше его исходного значения D_0 на величину 2δ . Таким образом, в этих условиях выполнения ЭКО происходит сьем слоя металла с поверхности самореза, т. е. его размерная обработка. Отсюда следует, что с целью предотвращения уменьшения диаметра самореза и придания его поверхности режущей способности выполнять ЭКО нужно при режимах, исключающих перекрытие лунок, т. е. при $k_{\text{л}} < 1$.

Фотографии следов на поверхности соснового образца, оставшихся после вкручивания в него саморезов, имеющих поверхность в исходном состоянии и после ее ЭКО, представлены на рис. 5.

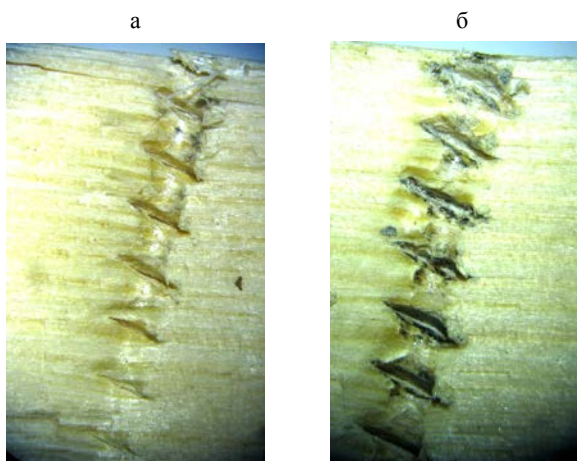


Рис. 5. Фотографии следов на поверхности соснового образца, оставшихся после вкручивания в него самореза:
а – в исходном состоянии его поверхности;
б – после ее ЭКО

Из сравнительного анализа рис. 5 видно, что в первом случае на поверхности образца заметны четкие винтовые канавки, выдавленные саморезом в дереве, без каких-либо следов разрушения дерева. Следы, оставшиеся на поверхности образца при вкручивании в него самореза, прошедшего ЭКО, содержат на выдавленных канавках продукты разрушения в виде мелких деревянных опилок. Их наличие подтверждает тот факт, что модифицированная поверхность самореза обладает режущей способностью, которую ей придают образовавшие-

ся по краям лунок наплывы застывшего металла, выходящие за ее исходный контур. Аналогичные продукты разрушения в виде мелкодисперсных опилок наблюдали при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью в образцы из других материалов. Исходя из этого можно констатировать, что процесс вкручивания таких саморезов сопровождается не только выдавливанием (уплотнением) материала образца, но и его микрорезанием. Принимая во внимание то обстоятельство, что наплывы металла по краям лунки (режущие элементы) располагаются симметрично, процесс выкручивания самореза также будет сопровождаться микрорезанием поверхности материала образца, сформированной в нем при вкручивании самореза. Очевидно, что отмеченные особенности протекания процессов вкручивания и выкручивания самореза с модифицированной за счет ЭКО поверхностью должны проявиться на характере изменения величины момента сил, прикладываемого к саморезу при выполнении указанных процедур.

На основании сравнительного анализа графиков изменения $M_{\text{кр}}$, полученных при вкручивании и выкручивании исследуемых саморезов в образцы из различных материалов, установлено следующее. При использовании мягких пород дерева, в частности сосны, влияние модификации поверхности самореза практически не сказывается на характере изменения и величине $M_{\text{кр}}$ по сравнению с вкручиваем и выкручиванием самореза в его исходном состоянии. При использовании образца из дуба, имеющего более высокую твердость, величина M_{max} при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью снизилась на 5,3 %, а при его выкручивании возрасла на 12,8 %. Для образца из оргстекла – соответственно на 5,8 и 13,9 %, для образца из текстолита – на 6,4 и 15,0 %. При использовании образца из кости величина M_{max} при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью снизилась на 3,5 %, а при его выкручивании возрасла на 10,4 %.

Таким образом, экспериментально установлено, что применение электроконтактной обработки поверхности саморезов позволяет снизить по сравнению с использованием саморезов в исходном состоянии величину крутящего момента при их вкручивании в материал и суще-

ственно ее повысить при выкручивании из него. В практическом плане полученные результаты имеют перспективу использования в технологии изготовления винтовых стоматологических имплантатов с целью облегчения условий их вкручивания в костную ткань и повышения прочности их закрепления в ней.

ВЫВОДЫ

1. С целью придания рабочей поверхности самореза режущей способности предложено осуществлять ее электроконтактную обработку, в результате которой на ней формируются углубления (лунки), имеющие по краям наплывы застывшего металла, выходящие за ее исходный контур и представляющие собой своеобразные режущие элементы.

2. На базе настольного токарного станка ТВ-4 создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять с помощью проволочных электродов-инструментов электроконтактную обработку рабочей поверхности самореза при различных режимах выполнения операции.

3. Разработана методика проведения сравнительных экспериментальных исследований по оценке влияния электроконтактной обработки исходной поверхности самореза на процесс его вкручивания и выкручивания в образцы из различных материалов. В частности, методика исследования следов, оставляемых в материале сборного образца при вкручивании в него исследуемого самореза, а также методика и аппаратные средства, позволяющие фиксировать на бумажном носителе график изменения вращающего момента, прикладываемого к саморезу, за время его вкручивания в образец и выкручивания из него.

4. По результатам измерений диаметров рабочей поверхности саморезов в исходном состоянии и после ее модификации установлено, что выполнение электроконтактной обработки при коэффициенте перекрытия лунок $k_d < 1$ приводит к увеличению исходного диаметра самореза на удвоенную величину образовавшихся на его поверхности наплывов металла. В случае выполнения электроконтактной обработки при $k_d > 1$ наблюдается уменьшение ис-

ходного диаметра самореза за счет удаления слоя металла с его поверхности.

5. На основании сравнительного анализа состояния следов, полученных на образцах в процессе вкручивания в них исследуемых саморезов, установлено, что при использовании саморезов, подвергнутых электроконтактной обработке, на сформированных в образцах винтовых поверхностях присутствуют мелкодисперсные опилки их материала, чего не наблюдается при вкручивании саморезов в исходном состоянии образца поверхности. Их наличие подтверждает тот факт, что за счет электроконтактной обработки исходной поверхности самореза она приобретает режущую способность.

6. На основании анализа экспериментально полученных графиков изменения крутящего момента $M_{кр}$, прикладываемого к испытываемому саморезу за время его вкручивания $t_{вк}$ в образец и выкручивания $t_{вык}$ из него, установлено следующее. В начале вкручивания прикладываемый к саморезу крутящий момент резко возрастает до величины M_n , после чего его значение снижается, а затем оно вновь возрастает, достигая своего максимума M_{max} при окончательном вкручивании самореза в образец. При его последующем выкручивании величина $M_{кр}$ сразу снижается от своего максимального значения M_{max} до нуля в отсутствие скачкообразного ее изменения в начале выполнения процедуры.

7. На основании сравнительного анализа экспериментально полученных зависимостей $M_{кр}(t_{вк})$ и $M_{кр}(t_{вык})$ установлено, что саморезы с модифицированной за счет электроконтактной обработки поверхностью обеспечивают в сравнении с саморезами в ее исходном состоянии при их вкручивании в образец меньшие значения как M_n , так и M_{max} и существенно большее значение M_{max} при выкручивании.

8. Показано, что выявленные особенности изменения крутящего момента при вкручивании и выкручивании саморезов с модифицированной за счет электроконтактной обработки поверхностью связаны с наличием на них режущих элементов, которые при вкручивании дополнительно осуществляют микрорезание материала образца, облегчая тем самым условия формирования в них винтовых поверхно-

стей за счет уплотнения материала. При выкручивании саморезов наличие на их поверхности режущих элементов в сочетании с оставшимися в канавках опилками материала приводит к увеличению крутящего момента в сравнении с его значением, соответствующим выкручиванию самореза в исходном состоянии его поверхности.

9. Установлено, что с повышением твердости материала образца указанные различия в значениях $M_{кр}$ при использовании саморезов с модифицированной за счет электроконтактной обработки поверхностью проявляются в большей степени. Так, при их вкручивании и выкручивании в образец из сосны (мягкая порода дерева) значения $M_{кр}$ практически не отличаются от значений, соответствующих использованию самореза в исходном состоянии его поверхности. Для образца из дуба величина $M_{кр}$ при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью снизилась на 5,3 %, а при его выкручивании возросла до 12,8 %. Для образца из оргстекла – соответственно на 5,8 и 13,9 %, из текстолита – на 6,4 и 15,0 %. При использовании образца из кости величина $M_{кр}$ при вкручивании самореза с модифицированной поверхностью снизилась на 3,5 %, а при его выкручивании возрасла на 10,4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Surface** Modification Process by Electrical Discharge Machining with a Ti Powder Green Compact Electrode / Z. L. Wang [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – No 129 (1–3). – P. 139–142.
2. **Harris, W.** The Problem of Osteolysis / W. Harris // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 1995. – No 311. – P. 46–53.
3. **Сирак, С. В.** Микроскопическое изучение поверхности винтовых дентальных имплантатов для прогнозирования остеоинтеграции / С. В. Сирак, М. Г. Петрикова // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – № 2. – С. 162–168.
4. **Metal** Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode / N. Mohri [et al.] // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1993. – No 42 (1). – P. 219–222.
5. **Surface** Modification by Electrical Discharge Machining: a Review / S. Kumar [et al.] // *J. of Materials Processing Technology*. – 2009. – No 209. – P. 3675–3687.
6. **Теоретическое** обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволоочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // *Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого*. – 2012. – № 3. – С. 3–10.
7. **Модификация** исходной поверхности проволоочно-го инструмента с целью придания ей режущей способно-

сти путем применения электроконтактной обработки / М. Г. Киселев [и др.] // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2012. – № 1 (34). – С. 13–22.

8. **Фотеев, Н. К.** Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

9. **Петров, Ю. Н.** Влияние технологических режимов механизированного электроискрового легирования на качество получаемой поверхности / Ю. Н. Петров, Л. И. Дехтярь, И. И. Сафронов // *Электронная обработка материалов*. – 1965. – № 3. – С. 45–49.

10. **Соколов, И. А.** Механизация процесса электроискрового легирования / И. А. Соколов // *Электронная обработка материалов*. – 1975. – № 1. – С. 33–34.

REFERENCES

1. **Wang, Z. L.,** Fang, Y., Wu, P. N., Zhao, W. S., & Cheng, K. (2002) Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with a Ti Powder Green Compact Electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (1–3), 139–142. Doi: 10.1016/S0924-0136(02)00597-6.
2. **Harris, W.** (1995) The Problem of Osteolysis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 311, 46–53. PubMed ID: 7634590.
3. **Sirak, S. V.,** & Petrikova, M. G. (2014) Microscopic Study of Screw Dental Implant for Osteo-Integration Forecasting. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamental'nykh Issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Investigations], 2, 162–168 (in Russian).
4. **Mohri, N.,** Saito, N., Tsunekawa, Y., & Kinoshita, N. (1993) Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 42 (1), 219–222. Doi: 10.1016/S0007-8506(07)62429-9.
5. **Kumar, S.,** Singh, R., Singh, T. P., & Sethi, B. L. (2009) Surface Modification by Electrical Discharge Machining: a Review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3675–3687. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032.
6. **Kiselev, M. G.,** Drozdov, A. V., Moskalenko, A. V., & Bogdan, P. S. (2012) Theoretical Substantiation of Rational Parameters for Electro-Arc Machining of Wire Tool. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta Imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], 3, 3–10 (in Russian).
7. **Kiselev, M. G.,** Drozdov, A. V., Moskalenko, A. V., & Bogdan, P. S. (2012) Modification of Initial Wire Tool Surface with the Purpose to Provide Cutting Ability to it While Using Electro-Arc Machining. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 1 (34), 13–22 (in Russian).
8. **Foteev, N. K.** (1980) *Technology of Electric Erosion Machining*. Moscow, Mashinostroyeniye. 184 p. (in Russian).
9. **Petrov, Yu. N.,** Dekhtiar', L. I., & Safronov, I. I. (1965) Influence of Technological Regimes of Mechanized Electro-Spark Doping on the Quality of the Obtained Surface. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Material Machining], 3, 45–49 (in Russian).
10. **Sokolov, I. A.** (1975) Mechanization of Electro-Spark Doping Process. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Material Machining], 1, 33–34 (in Russian).

Поступила 16.02.2015

АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНОГО ПОВЕДЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ КРУПНОГАБАРИТНОГО СТАНКА ТИПА «ПОДВИЖНАЯ СТОЙКА»

Докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В., канд. техн. наук, доц. ДОВНАР С. С.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ssdov@tut.by

Выполнен МКЭ-анализ динамики несущей системы уникального по высоте станка. Это единственный станок типа Travelling column с высокой подвижной стойкой, по которой вертикально может перемещаться суппорт с горизонтальным ползуном. В рабочем торце ползуна телескопически смонтированы фрезерный и расточной шпиндельные узлы. МКЭ-анализ станка производили в связи с его реновацией. Оценивали резонансы станка, отклики на силы резания, статическую и динамическую жесткость на шпинделях. Несущая система станка является субтильной, тяжелой и сложносоставной. Это цепочка из салазок, стойки, суппорта, ползуна, шпиндельных узлов, связанных гидростатическими направляющими. Исследовали влияние на жесткость такой цепочки варьирования ведущих параметров, при этом изменяли высоту подъема суппорта, материал стойки и жесткость продольного привода.

Проведены статический, модальный и гармонический МКЭ-анализы. Построена амплитудно-частотная характеристика станка. Обнаружены два изгибных резонанса суппорта на стойке на низких частотах. Это ограничивает использование станка в дорезонансном и статическом диапазонах частот. Самый мощный резонанс был на частоте 27,8 Гц. Он заключается в крутильных колебаниях стойки вместе с суппортом и ползуном. На более высоких частотах 65–105 Гц выявлен диапазон изгибных резонансов ползуна. Между резонансными диапазонами найдены три интервала, пригодных для эксплуатации станка. Станок перспективно использовать в межрезонансном (32–65 Гц) и зарезонансном (более 105 Гц) интервалах. Показано, что в динамических интервалах жесткость на шпинделе на порядок выше, чем в статическом интервале. Субтильность станка может быть компенсирована переходом к высокоскоростной обработке.

Ключевые слова: МКЭ, станок, жесткость, резонанс, АЧХ, вибрация, высокоскоростная обработка.

Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 12 назв.

RESONANCE BEHAVIOUR ANALYSIS OF CARRYING SYSTEM IN HEAVY MACHINE WITH TRAVELING-COLUMN

VASILEVICH Yu. V., DOVNAR S. S.

Belarusian National Technical University

A finite elements method (FEM)-analysis has been carried out with the purpose to study dynamics of carrying system in a machine tool of unique height. This is a one-off machine with high traveling column and a support with horizontal slide can move vertically along the column. Spindle milling and boring units are mounted telescopically at slide butt end. The FEM-analysis of the machine tool has been made due to its renovation. Machine resonances, responses to cutting force, static and dynamic rigidity in spindles have been estimated in the paper. The machine carrying system is subtle, heavy and structurally complicated. Its structural chain includes a carriage, a column, a support, a slide, spindle units interconnected with the help of hydro-static guides. While varying main parameters their influence on rigidity has been investigated in the paper. Height of support lifting, column material and rigidity of longitudinal drive have been changed during the investigations.

Static, modal and harmonic MEF-analyses have been executed in the paper. Frequency-response characteristic of the machine has been constructed in the process of the investigations. Two support bending resonances have been detected in the column at low frequency. Such Due to this there are limits for usage of the machine in sub-resonance and static frequency range. The most powerful resonance has been observed at frequency of 27.8 Hz. The resonance has manifested itself as torsional oscillations of the column together with the support and the slide. Slide bending resonances have been revealed at higher frequencies 65–105 Hz. Three intervals which are fit for machine operation have been determined between resonance ranges. There is a prospective usage of the machine in inter-resonance (32–65 Hz) and super-resonance (more than 105 Hz) intervals. It has been shown that rigidity in spindle is a sequence higher in dynamic intervals than in a static interval. Machine subtility can be compensated by its transition to high-speed machining.

Keywords: FEM (finite elements method), machine tool/machine, rigidity, resonance, amplitude-frequency characteristic, oscillation, high-speed machining.

Fig. 5. Tab. 4. Ref.: 12 titles.

Предмет исследования. Объектом исследования является несущая система уникального по габаритам единичного станка типа «по-

движная стойка» (Travelling column). Этот станок (далее – ТС-станок) отличается большой высотой (7,2 м) и предназначен для фрезерно-

сверлильно-расточной обработки особо крупных деталей. Трехмерная модель станка представлена на рис. 1 в разных резонансных возбуждениях. Стойка 5–6 (массой 21,77 т) может перемещаться в продольном направлении (ось X) на салазках 7 (10,94 т) под действием привода (образом его является пружина 8). Суппорт 3 (13,78 т) обладает высотой подъема (ось Y) по стойке $h = 4$ м. Сквозь суппорт может

выдвигаться на расстояние до 1,6 м (ось Z) ползун 2 длиной 4,5 м, сечением $0,59 \times 0,59$ м и массой 6,3 т с главным двигателем 4. В рабочем торце ползуна смонтирован полый фрезерный шпиндельный узел (ШУ). Из него может дополнительно выдвигаться на расстояние до 1000 мм расточной шпиндель, непосредственно удерживающий инструмент. Стол с заготовкой на рис. 1 не показан.

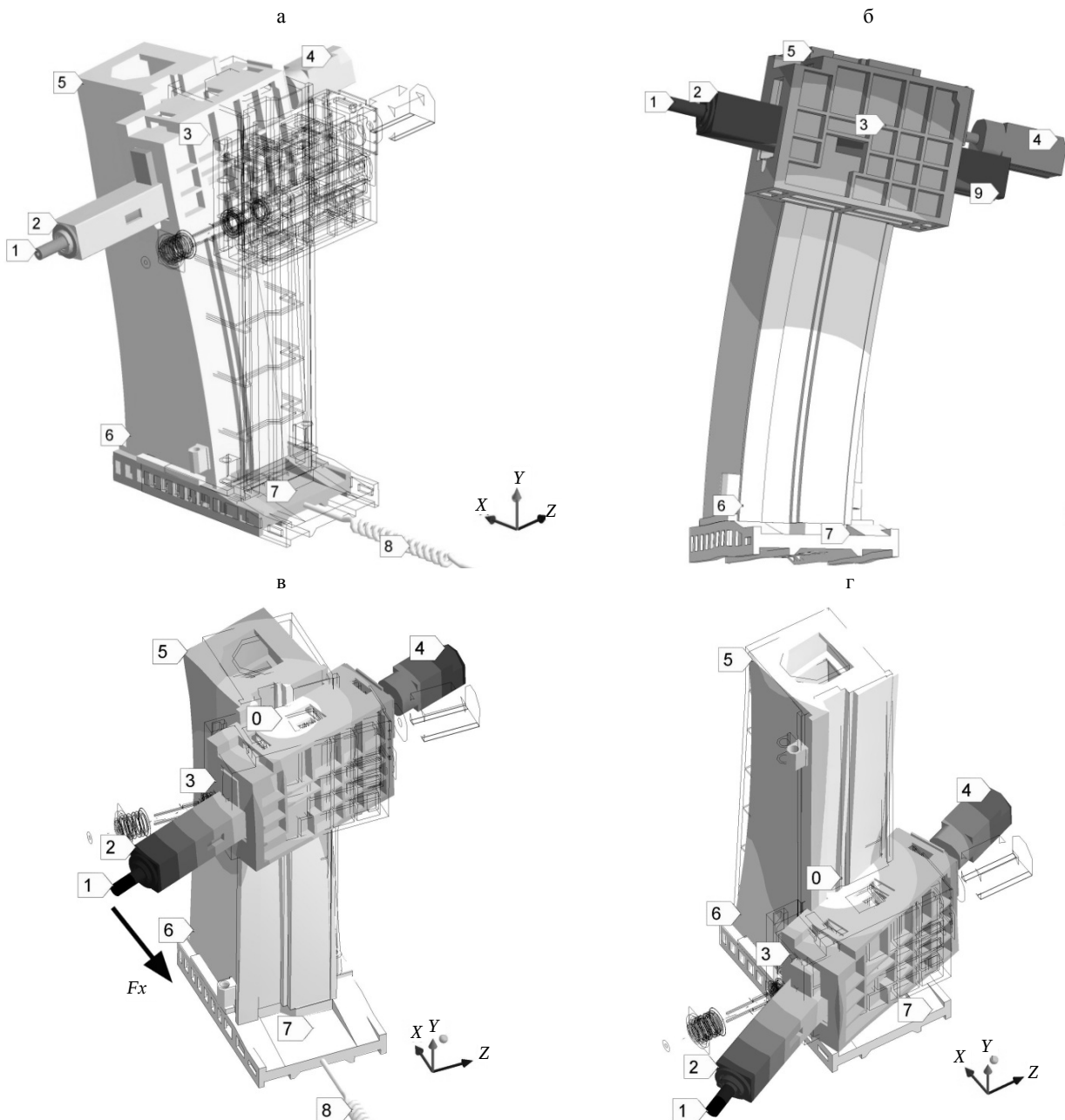


Рис. 1. Несущая система ТС-станка в условиях продольного $M1$ (ось X) (а) поперечного $M2$ (Z) резонансов (б) и крутильного резонанса $M3$ вокруг оси Y (в, г – верхнее и нижнее положения суппорта 3 на стойке 5–6): 1 – расточной шпиндель (Р); 2 – торец ползуна (П) с фрезерным шпинделем; 4 – двигатель; 7 – салазки; 8 – привод (пружина) по X

Уникальный экземпляр станка по заказу российского предприятия прошел капитальную реновацию на белорусском ОАО «МЗОР». Суппорт и ползун были спроектированы заново с участием немецких и польских инженерных фирм, стойка повторно обработана. Станок получил новые направляющие, приводы и систему ЧПУ.

Вследствие больших габаритов и массы ТС-станка можно ожидать сильных низкочастотных резонансов в его несущей системе [1]. Резонансная раскачка от сил резания нарушает точность обработки. Поэтому в начале реновации было важно предсказать динамическое поведение станка и сделать рекомендации по его эксплуатации. Этой цели достигали путем виртуальных испытаний с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [2]. В ходе моделирования выясняли резонансные частоты, статическую и динамическую жесткости на шпинделе. Результаты МКЭ-анализа проверяли натурными тестами, а также ударными пробами с регистрацией спектров колебаний виброметром.

Было установлено, что поведение станка обладает спецификой в каждом из трех направлений X , Y , Z . В статье описывается часть результатов, обсуждаются самые нижние, основные резонансы станка, а также поведение несущей системы при колебательном воздействии сил резания в продольном направлении X .

Геометрическая модель станка. В геометрическую модель включены только детали несущей системы. Главной деталью является полая литая чугунная стойка. Она взята из исходной комплектации станка как ценная деталь, прошедшая естественное старение (более 30 лет) и обладающая размерной стабильностью. При высоте 6700 мм стойка имеет среднее сечение 1715×1540 мм. Фактор субтильности (отношение высоты к горизонтальному габариту) составляет $S_M = 4,1$. Это большая величина. Склонность стойки к колебаниям должна быть повышенной.

Стенки стойки имеют характерную толщину 40 мм. Внутри есть развитое перекрестное ребрение с вертикальным шагом 950 мм, высотой ребер 100 мм при толщине 25–30 мм. Масса суппорта в сборе составляет 28080 кг. Это существенный груз для стойки. Нижнему положению суппорта (рис. 1г) припишем высо-

ту $h = 0$ м, а верхнему (рис. 1в) $h = 4$ м. Суппорт отлит из чугуна. Ползун выкован из стали. В парах «стойка – суппорт» и «суппорт – ползун» предусмотрены гидростатические направляющие. В геометрической модели они представлены бронзовыми накладками.

Из многочисленных траекторных двигателей станка в модели учтен только тяжелый двигатель главного привода (4 на рис. 1). Двигатель является своеобразным противовесом рабочему концу ползуна со шпиндельными узлами.

Фрезерный и расточной шпиндельные узлы представлены упрощенно. Детальная проработка их не требуется, так как резонансы внутри шпинделей начинаются обычно выше 200 Гц [3]. Целью исследований являлись низкочастотные общестаночные резонансы. Для станков ОАО «МЗОР» они находятся, как правило, в диапазоне 20–100 Гц [3, 4].

Конечно-элементная модель и свойства материалов. Моделирование проводили по методикам [3–8]. Применяли сетки тетраэдральных конечных элементов. Они были оптимизированы для выявления картин перемещений станка в статике и динамике. Напряжения в несущей системе были невелики и не угрожали прочности конструкции. Стойку виртуально испытывали с тремя материалами – чугуном, сталью и алюминием. Это отражает разные варианты изготовления (если делать стойку заново). Свойства материалов указаны в табл. 1.

Таблица 1
Свойства моделируемых материалов

Материал	Модуль упругости E , ГПа	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона μ	Соотношение $k = E/\rho$
Сталь	200	7850	0,30	0,0254
Чугун	130	7200	0,28	0,0180
Алюминий	71	2770	0,33	0,0256

Величины модуля упругости указывают на то, что при одинаковой геометрии стойки в статике наибольшую жесткость обеспечивает сталь. Почти вдвое податливее должна быть стойка из алюминия. В динамике это не столь очевидно, так как играет роль отношение упругости к плотности (коэффициент k). Данный параметр почти одинаков у стали и алюминия.

Всем материалам приписывали коэффициент демпфирования ξ . Он важен для оценки резонансной раскачки в гармоническом анализе. В базовом варианте (БВ) для всех материалов назначали коэффициент $\xi = 2\%$. Для станков с чугунными корпусными деталями это средний уровень демпфирования [9].

Граничные и контактные условия. Салазки (рис. 1) под стойкой 5–6 в МКЭ-модели считаются опирающимися на жесткое основание. Салазки могут свободно скользить только вдоль X . Это моделирует гидростатические направляющие во включенном состоянии. Перемещения по X контролируются пружиной 8. Она представляет зубчато-реечный привод с редуктором. Для удобства был установлен БВ условий: в нем жесткость пружины по каталогу назначалась равной 600 Н/мм.

Гидростатические направляющие между парами «стойка – суппорт» и «суппорт – ползун» в рамках данного исследования были заблокированы. Расточной шпиндель выдвинут из торца ползуна в БВ наполовину (500 мм). Расточной, фрезерный шпиндель и ползун скреплены друг с другом. Вращение шпинделей не моделировалось.

Несущая система станка, как в статике, так и в динамике, нагружается единообразным образом – продольной силой на конце расточного шпинделя (рис. 1в). Для статического случая это пробная сила $F_X^{\text{ст}} = 1000$ Н. Величина силы не принципиальна, так как конечно-элементная задача сформулирована линейно. В модальном анализе (поиск резонансных мод) нагружение не требуется. В гармоническом анализе на разных частотах испытания $f_{\text{и}}$ прикладывается динамическая осциллирующая сила $F_X^{\text{д}} = A_X \sin 2\pi f_{\text{и}}$, где $A_X = 1000$ Н – амплитуда силы.

Подчеркнем, что моделируемая система – сложносоставная. В ней контактными конечными элементами соединено большое количество крупных и мелких деталей. Общей идеей описываемого МКЭ-анализа является варьирование свойств ключевых деталей (прежде всего, стойки). Забегая вперед, сообщим, что вариации сглаживаются составной несущей системой. Последняя проявляет самостабилизованность, инвариантность поведения. Так,

податливость на шпинделе (обратная жесткости величина) составлена из податливостей всех деталей несущей системы – по цепочке от салазок до ползуна со шпиндельными узлами. В ходе МКЭ-анализа наблюдается, что изменение податливости одного звена в цепочке компенсируется в масштабах системы (как в статике, так и в динамике).

Статический анализ. По результатам статических нагружений статическую жесткость станка вычисляли по формулам типа $j_X^{\text{ст}} = F_X^{\text{ст}} / \delta_X$ (где δ_X – перемещение по X или на конце расточного шпинделя ($\delta_X^{\text{Р}}$, маркер 1 на рис. 1) или на ползуне ($\delta_X^{\text{П}}$, маркер 2)).

Две близкие кривые «Р сталь» и «Р чугун» (рис. 2) получены для конца расточного шпинделя для двух материалов стойки. Выдвинутый на 500 мм шпиндель оказался весьма податливым. Поэтому на его конце почти не ощущалось, сделана стойка из чугуна или стали. Подъем кривых влево мал. Статическая жесткость возрастает при полном опускании суппорта только на 27,8 %. Можно говорить о некоторой независимости статической жесткости на расточном шпинделе от вариаций несущей системы станка.

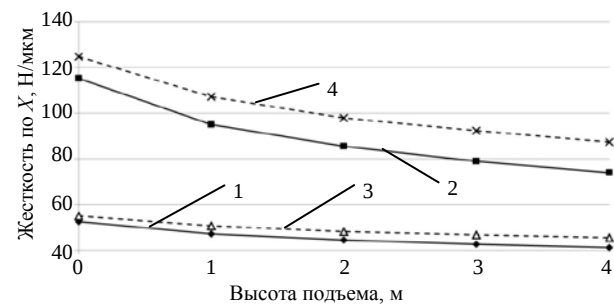


Рис. 2. Влияние высоты подъема суппорта h на статическую жесткость станка $j_X^{\text{ст}}$

(Р – расточной шпиндель; П – рабочий торец ползуна):
1 – Р чугун; 2 – П чугун; 3 – Р сталь; 4 – П сталь

Статическая жесткость на рабочем конце ползуна (кривые «П сталь» и «П чугун») больше зависит от положения суппорта. При полном опускании суппорта крутильная жесткость стойки должна была бы возрасти в восемь раз (для элементарной аналитической модели закручиваемого стержня). Однако МКЭ-расчет показывает подъем кривых только в 1,5 раза. Это общая особенность статического поведения

крупногабаритных сложносоставных станков. Одна вариация, даже сильная (например, опускание суппорта), «размывается» в масштабах машины. До шпинделя может «дойти» довольно скромное изменение жесткости.

Статическая податливость на торце ползуна при виртуальном выборе в качестве материала стойки стали, чугуна и алюминия отражена в табл. 2. Видно, что чугунная литая стойка (по сравнению со сварной стальной) увеличивает податливость на шпинделе не более чем в 1,17 раза. Это виртуально наблюдается при различии модулей упругости чугуна и стали в 1,54. Следовательно, опять просматривается жесткостная самостабилизация несущей системы. Эта особенность тяжелых сложносоставных станков в статике наблюдалась и ранее [5, 7].

Таблица 2

Перемещение торца ползуна δ_x^{Π}
от статической силы $F_x^{ст} = 1000 \text{ Н}$

Показатель	Высота подъема суппорта h , м				
	0	1	2	3	4
Перемещение δ_x^{Π} для стали, мкм	8,02	9,33	10,21	10,83	11,45
Увеличение δ_x^{Π} для чугуна, %	8,3	12,8	14,6	16,9	17,9
Увеличение δ_x^{Π} для алюминия, %	27,1	43,5	50,2	56,8	62,4

Применение алюминия в статических условиях повышает податливость в 1,62 раза, но это справедливо только в верхнем положении суппорта. В нижнем положении смена материала

стойки слабо воздействует на статическую податливость.

Модальный анализ. Самые низкочастотные резонансы станка связаны с изгибом стойки (рис. 1). Для БВ условий на частоте $f_1 = 11,7 \text{ Гц}$ обнаружены продольные колебания системы (М1). Суппорт как груз раскачивается на консольной балке – стойке. Похожий резонанс в поперечном направлении (М2) наблюдается на частоте $f_2 = 12,49 \text{ Гц}$. Получается, что резонансные частоты ТС-станка довольно низки (немного превышают 10 Гц). Диапазон дорезонансной статической работы узок. Для серийных станков ОАО «МЗОР» характерны более высокие резонансы: обычно они на октаву выше и начинаются в районе 20 Гц [3, 8].

Сводка резонансных частот дана в табл. 3. Видно, что и высота суппорта, и материал стойки слабо влияют на резонансные частоты. Особенно характерно это для колебаний по М1. Спуск суппорта должен повышать изгибную жесткость из-за укорочения нижнего рабочего участка стойки (3–6 на рис. 1). Однако соответствующее увеличение частоты f_1 происходит только в 1,24 раза (до 14,61 Гц). Вероятно, рост f_1 блокируется растущей инерционностью верхнего свободного участка стойки 3–5.

МКЭ-анализ показал, что несущей системе присущ крутильный резонанс М3 (рис. 1б, в). Он заключается в упругом закручивании суппорта с ползуном и двигателем на стойке как на упругом стержне. Ось закручивания вертикальна (примерно указана маркером О) и меняет свое положение.

Таблица 3

Частоты резонансов М1–М3 в зависимости от высоты подъема суппорта и материала стойки

Материал стойки	Резонансная мода	Частота резонанса, Гц, при высоте подъема суппорта h , м				
		0	1	2	3	4 (БВ)
Чугун (БВ)	М1	14,61	14,05	13,39	12,61	11,70
	М2	18,69	17,58	15,97	14,17	12,49
	М3	34,59	29,06	27,58	27,39	27,85
Сталь	М1	14,67	14,27	13,80	13,22	12,54
	М2	18,89	18,19	17,10	15,66	14,07
	М3	38,01	32,55	31,02	30,94	31,58
Алюминий	М1	16,38	15,21	13,83	12,11	10,37
	М2	18,43	16,67	14,60	12,77	11,23
	М3	28,53	24,17	23,04	22,95	23,25

При максимально поднятом суппорте (рис. 1в) маркер О находится именно на суппорте. При опускании суппорта маркер О смещается внутрь стойки (рис. 1г). Следовательно, при ходе суппорта вниз ось закручивания от него отдаляется. Момент инерции суппорта с ползуном увеличивается. Это самопроизвольный процесс. Вероятно, он компенсирует рост крутильной жесткости рабочего участка стойки при спуске суппорта. В результате частота крутильных колебаний по МЗ почти не зависит от параметра h в диапазоне 1–4 м (верхние кривые на рис. 3). Для чугунной стойки частота f_3 находится в диапазоне от 27,85 до 29,05 Гц. И только спуск суппорта до уровня 0 поднимает частоту f_3 до 34,59 Гц. Кривые для алюминиевой стойки ведут себя аналогично рис. 3. Они проходят немного ниже линий для чугуна.

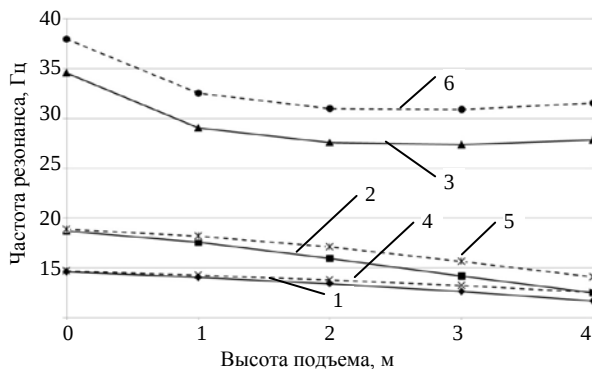


Рис. 3. Влияние подъема суппорта h на резонансные частоты для мод М1–МЗ: 1 – М1 чугун; 2 – М2 чугун; 3 – МЗ чугун; 4 – М1 сталь; 5 – М2 сталь; 6 – МЗ сталь

Графики на рис. 4 получены путем варьирования жесткости продольного привода в диапазоне от 75 до 1200 Н/мкм. Правые точки на всех кривых соответствуют жесткому закреплению салазок. Чувствительность к жесткости привода проявила лишь мода М1.

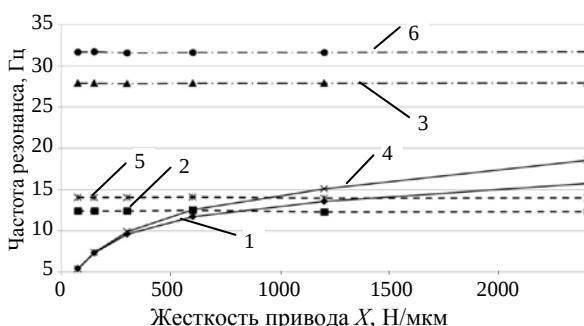


Рис. 4. Влияние жесткости $J_X^{\text{пр}}$ продольного привода X и материала стойки (сталь, чугун) на резонансные частоты М1–МЗ: 1 – М1 чугун; 2 – М2 чугун; 3 – МЗ чугун; 4 – М1 сталь; 5 – М2 сталь; 6 – МЗ сталь

Однако ее частота начинает существенно снижаться только после падения жесткости ниже $J_X^{\text{пр}} = 300$ Н/мкм. Итак, основной чертой поведения сложносоставной несущей системы станка является инвариантность (самостабилизированность) по отношению к варьированию весьма разных параметров станка. В динамике для других видов тяжелых станков этот эффект уже описан [3, 4, 8].

Гармонический анализ и амплитудно-частотная характеристика несущей системы. Результаты гармонического анализа в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) представлены на рис. 5. Входом является продольная гармоническая сила $F_X^{\text{д}}$, выходом служит амплитуда A_{δ_X} колебаний фрезерного шпинделя в том же направлении. Виртуальные испытания проводили для демпфирования $\xi = 2\%$ в диапазоне от 0 до 150 Гц с шагом 1 Гц для двух положений суппорта по высоте.

Пики 1 и 3 отражают резонансные возбуждения по модам М1 и МЗ. Мода М2 поперечная (вдоль Z) и поэтому не проявляет себя на данной АЧХ. Крутильный резонанс по МЗ оказывается самым мощным. Амплитуда при нем достигает 160,2 мкм, что соответствует очень низкой жесткости 6,24 Н/мкм [10, 11]. Продольный резонанс по М1 в 2,27 раза слабее (амплитуда 70,3 мкм). На частоте 1 Гц (почти статическое испытание) амплитуда колебаний равна 15,8 мкм. Следовательно, коэффициент динамичности составляет для М1 и МЗ соответственно 4,45 и 10,10.

На рис. 5 видно, что для разных высот подъема суппорта характерные пики АЧХ остаются почти неизменными. Диапазон от 8 до 32 Гц занят резонансами М1–МЗ, и поэтому его можно назвать диапазоном изгибно-крутильных резонансов (ИКР-диапазоном). Диапазон от 65 до 105 Гц назовем РП-диапазоном. Он связан с изгибными резонансами ползуна и сопряженных объектов. Вместе с ползуном колеблются двигатель, суппорт и прилегающая часть стенок стойки. Вместе диапазоны ИКР и РП образуют диапазон общестаночных резонансов (ОСР). Особенность ОСР-диапазона – на каждом резонансе станок (или его большая часть) охвачен каким-то единообразным модальным движением. Движение простое по сути (изгиб, кручение) и имеет минимальное число пучностей.

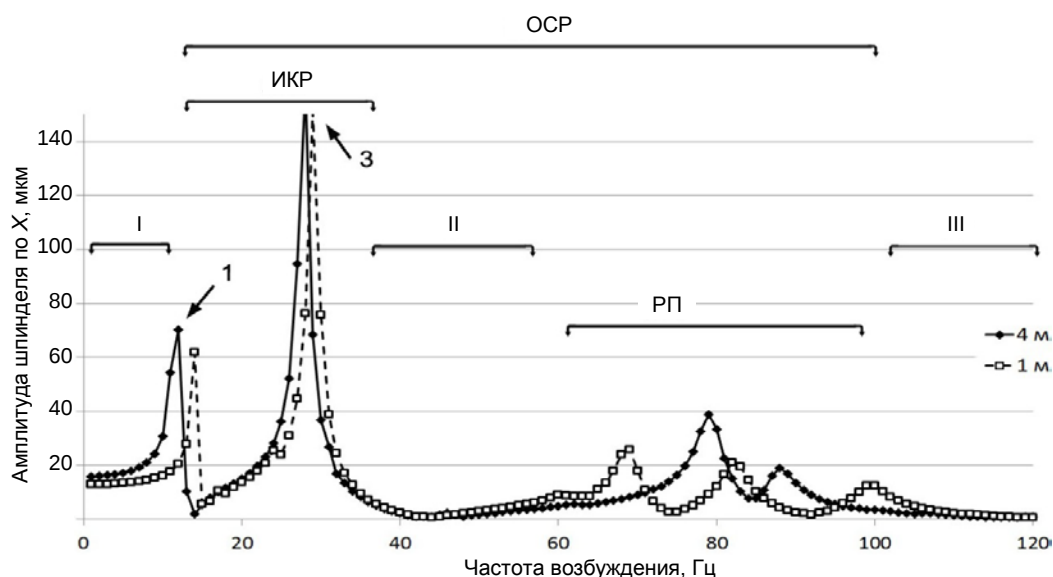


Рис. 5. АЧХ станка при возбуждении гармонической продольной силой 1000 Н для положений суппорта по высоте 1 и 4 м (демпфирование $\xi = 2\%$)

Между резонансными пиками на АЧХ наблюдаются интервалы инерционного поведения станка. Станок слабо откликается на силу резания. Такие интервалы перспективны для точной обработки. Выделим статический I (0–8 Гц), межрезонансный II (32–65 Гц) и зарезонансный III (от 105 до, по крайней мере, 150 Гц) интервалы. Статический интервал I узок. В нем невозможно обеспечить высокую частоту шпинделя и, конечно, достичь производительности и качества обработки поверхности. Интервал II соответствует частотам, когда изгибно-крутильные раскачивания стойки уже затухли, а изгибные колебания балки-ползуна еще не начались. Верхняя граница интервала III не ясна. Скорее всего, ее ограничат резонансы внутри ШУ.

По АЧХ построена табл. 4. Из нее вытекает, что в динамических интервалах II и III характерная жесткость на порядок выше, чем в статическом интервале I. Малая податливость обусловлена инерцией масс в несущей системе. Работа в интервалах II и III позволяет обеспечить точность резания, несмотря на субтильность конструкции стойки. Таким образом, по соображениям производительности, точности и качества получаемой поверхности для ТС-станка рекомендуется концепция высокоскоростной обработки [12] при использовании интервалов II и III.

Таблица 4

Жесткость шпинделя в рабочих интервалах I–III

Частота, Гц	Интервал	Амплитуда перемещения, мкм	Жесткость, Н/мкм	Увеличение жесткости (к интервалу I)
5	I	17,17	58,50	–
50	II	1,59	628,90	10,75
150	III	1,99	502,50	8,59

ВЫВОДЫ

1. Изгибные резонансные моды M1 и M2 стойки с суппортом являются низкочастотными (11,7 и 12,5 Гц). Самый мощный крутильный резонанс (M3) ползуна и суппорта на стойке происходит на частоте 27,8 Гц.

2. Можно говорить об определенной инвариантности изгибно-крутильных мод сложносоставной несущей системы станка, по крайней мере, по отношению к высоте суппорта, материалу стойки и жесткости продольного привода.

3. Между диапазонами общестаночных резонансов выделены три пригодных для обработки частотных интервала: статический I, межрезонансный II и зарезонансный III. Статический интервал I узок (0–8 Гц) из-за низких частот мод M1 и M2. Рекомендуется использовать станок в довольно широких интервалах частот II (32–65 Гц) и III (>105 Гц). Здесь дина-

мическая жесткость станка может на порядок превышать статическую жесткость. Потребуется применять технологии высокоскоростной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
2. **Зенкевич, О.** Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
3. **Василевич, Ю. В.** Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ / Ю. В. Василевич, С. С. Довнар, И. И. Шумский // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 14 – 24.
4. **Василевич, Ю. В.** МКЭ-анализ гармонического возбуждения горизонтального фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричной стойкой / Ю. В. Василевич, С. С. Довнар, А. С. Трусковский // Машиностроение: Республ. межведом. сб. науч. трудов. – 2014. – Вып. 28. – С. 112–120.
5. **Баланс жесткости стойки фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки** / В. И. Турумша [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2012. – № 3 (50). – С. 19–29.
6. **Модальный анализ портала тяжелого продольно-фрезерного станка типа «Гентри»** / В. И. Турумша [и др.] // Вестник ПГУ. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 38–48.
7. **Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри»** / В. И. Турумша [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2011. – № 3 (46). – С. 15–28.
8. **Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ** / С. С. Довнар [и др.] // Вестник ПГУ. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 25–36.
9. **Lopez de Lacalle, L. N.** Machine Tools for High-Performing Machining / L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – London: Springer, 2009. – 442 p.
10. **Stability Prediction for Milling** / J. Gradisek [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – 45 (7–8). – P. 769–781.
11. **Altintas, Y.** Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding / Y. Altintas, M. Weck // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 53, No 2. – P. 619–642.
12. **Кунец, Г.** Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости / Г. Кунец // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – С. 35–37.
3. **Vasilevich, Yu. V.,** Dovnar, S. S., & Shumsky, I. I. (2014) Modal Analysis of Carrying System for Heavy Horizontal Multi-Purpose Machine Tool Using FEM (Finite Elements Method). *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 4, 14–24 (in Russian).
4. **Vasilevich, Yu. V.,** Dovnar, S. S., & Truskovsky, A. S. (2014) FEM-Analysis of Harmonic Excitation in Horizontal Milling-Drilling-Boring Machine with Symmetric Column. *Mashinostroenie. Respublikanskii Mezhvedomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov Mashinostroenie* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers], 28, 112–120 (in Russian).
5. **Turomsha, V. I.,** Dovnar, S. S., Truskovsky, A. S., & Shumsky, I. I. (2012) Balance of Column Rigidity in Milling-Drilling-Boring Machine with Symmetric Position of Spindle Unit. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta Imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University Named After P. O. Sukhoi], 3 (50), 19–29 (in Russian).
6. **Turomsha, V. I.,** Dovnar, S. S., Truskovsky, A. S., & Tumi El'-Mabruk Abuzhafer Ali. (2013) Modal Analysis of Portal in Heavy Plano-Milling Machine of Gantry-Type. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences], 3, 38–48 (in Russian).
7. **Turomsha, V. I.,** Dovnar, S. S., Truskovsky, A. S., & Tumi El'-Mabruk Abuzhafer Ali. (2011) Analysis of Rigidity in Gantry Portal of Plano-Milling Machine of Gantry. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta Imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University Named After P. O. Sukhoi], 3 (46), 15–28 (in Russian).
8. **Dovnar, S. S.,** Iakimovich, A. M., Kovaleva, I. L., & Shumsky, I. I. (2014) Harmonic Analysis of Portals in Heavy Plano-Milling Machines of Gantry-Type While Using Finite Elements Method (FEM). *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences], 11, 25–36 (in Russian).
9. **Lopez de Lacalle, L. N.,** & Lamikiz, A. (2009) *Machine Tools for High-Performing Machining*. London, Springer. 442 p.
10. **Gradisek, J.,** Kalveram, M., Insperger, T., Weinert, K., Ste'pan, G., & Grabec, I. E. (2005) Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (7–8), 769–781. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.015.
11. **Altintas, Y.,** & Weck, M. (2004) Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 53 (2), 619–642. Doi: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8.
12. **Kunets, G.** (2004) High-Speed Machining and Conventional Technological Basis: Overcoming Compatibility. *Mir Tekhniki i Tekhnologii* [World of Engineering and Technologies], 6, 35–37 (in Russian).

REFERENCES

1. **Kudinov, V. A.** (1967) *Machine-Tool Dynamics*. Moscow, Mashinostroenie. 359 p. (in Russian).
2. **Zenkevich, O.,** & Morgan, K. (1986) *Finite Elements and Approximation*. Moscow, Mir. 312 p. (in Russian).

Поступила 04.02.2015

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПРИВОДОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ТЕХНИКИ

*Канд. техн. наук, доц. КОТЛОБАЙ А. Я.,
инженеры КОТЛОБАЙ А. А., ЮНУСОВ Ю. Ш.,
канд. воен. наук, доц. ТАМЕЛО В. Ф.*

Белорусский национальный технический университет

E-mail: kotlo@tut.by

Техника, стоящая на вооружении в частях инженерных войск, соответствует своему назначению, и применение ее в современных условиях актуально. Поддержание работоспособного состояния инженерного оборудования, ранее выпускавшегося предприятиями в СССР, является сложной задачей из-за отсутствия запасных частей, производство которых прекращено.

Одно из направлений поддержания боеспособности инженерной техники – модернизация систем приводов ее рабочего оборудования, предполагающая замену механических систем приводов рабочих органов гидравлическими объемными приводами, реализованными на современной элементной базе. Использование гидравлических агрегатов систем приводов, выпускаемых серийно, вместо механических, произведенных ранее малыми сериями, позволит снизить трудозатраты при техническом обслуживании и ремонте машин. В статье изложены некоторые возможности развития систем приводов рабочего оборудования инженерной техники на примере инженерной машины разграждения ИМР-2М и котлованных машин МДК-3 и МДК-2М.

Применение гидравлического привода рабочих органов котлованных машин позволит отказаться от карданных валов, коробки скоростей, поворотного редуктора и предохранительной муфты. Гидравлический мотор привода фрезы и метателя устанавливается на редуктор рабочего органа. В рамках модернизации гидросистем котлованных машин для привода фрезы и метателя предложена насосная установка, состоящая из регулируемого насоса и системы автоматического поддержания параметров работы насоса. Развитие систем приводов рабочего оборудования инженерных машин по указанным направлениям позволит упростить систему приводов рабочих органов и обеспечить надежную эксплуатацию машины в частях инженерных войск.

Ключевые слова: инженерная техника, система привода рабочего оборудования инженерной техники, инженерная машина разграждения, котлованная машина, модернизированный гидропривод рабочих органов инженерных машин.

Ил. 4. Библиогр.: 12 назв.

DEVELOPMENT OF OPERATING DRIVE SYSTEMS IN ENGINEERING EQUIPMENT

KOTLOBAI A. Ya., KOTLOBAI A. A., YUNUSOV Yu. Sh., TAMELO V. F.

Engineering machines being in operational service with military units of engineer troops are fit to their purpose and their application is relevant in modern conditions. Maintenance of operating conditions in engineering equipment which was produced earlier by the USSR enterprises is considered as a rather complicated task due to lack of spare parts because their production has been discontinued.

One of the approaches used for maintenance of engineering equipment combat capabilities is modernization of operating drive systems that presupposes replacement of mechanical systems in working element drives by hydrostatic drives which are realized while using modern element base. Usage of hydraulic units in drive systems being in mass production for replacement of mechanical systems manufactured earlier in small batches makes it possible to reduce labour inputs for maintenance and repair of machines. The paper presents some possibilities for development of operating drive systems in engineering equipment. The proposed approach is given through an example of engineering obstacle-clearing vehicle (IMR-2M) and excavation machines (MDK-3 and MDK-2M).

Application of a hydraulic drive in working elements of the excavation machines permits to withdraw from cardan shafts, a gear box, a rotary gear and an overload clutch. A hydraulic motor of the cutter and thrower drive is mounted on a working element gearbox. While executing modernization of hydraulic systems in excavation machines a pump unit has been proposed for the cutter and thrower drive which consists of a controlled pump and a system for automatic maintenance of the pump operational parameters. While developing the operating drive systems in engineering equipment in accordance with the pro-

posed requirements it is possible to simplify drive systems of working elements and ensure reliable machinery operation in the units of engineer troops.

Keywords: engineering equipment, operating drive systems of engineering equipment, engineering obstacle-clearing vehicle, excavation machine, modernized hydraulic drive of working elements in engineering machines

Fig. 4. Ref.: 12 titles.

Введение. Техника, стоящая на вооружении в частях инженерных войск, соответствует своему предназначению, и применение ее в современных условиях актуально. Поддержание работоспособного состояния высокопроизводительного инженерного оборудования, ранее выпускаемого предприятиями СССР малыми сериями, систем отбора мощности двигателя машины на привод рабочих органов является сложной задачей из-за отсутствия запасных частей, производство которых прекращено. Как правило, ресурс базовых гусеничных шасси инженерной техники не выработан, основные их узлы и агрегаты производятся предприятиями Российской Федерации и доступны для поддержания работоспособного состояния. Рабочие органы инженерной техники не требуют радикальной переработки, поскольку инженерные решения, заложенные в конструкции машин, актуальны и на современном этапе [1, 2].

Развитие систем приводов рабочего оборудования инженерных машин. Одно из направлений поддержания боеспособности инженерной техники – развитие систем приводов рабочего оборудования, включающее замену ряда механических систем приводов рабочих органов гидравлическими объемными приводами, реализованными на современной элементной базе гидравлической аппаратуры, предпочтительно производства предприятий Республики Беларусь и Российской Федерации [3, 4]. Использование стандартных гидравлических агрегатов систем приводов вместо механических, выпускаемых малыми сериями, позволит снизить трудозатраты при модернизации, техническом обслуживании и ремонте машин. Системы гидравлических приводов рабочего оборудования могут развиваться в направлении формирования моноагрегатных насосных установок на базе использования многопоточных насосов либо оснащения однопоточных насосов агрегатами деления потока рабочей жидкости [5–7].

Направления развития должны формироваться по каждой инженерной машине исходя

из ее конструктивной схемы. Рассмотрим формирование направлений модернизации приводов рабочих органов на примере инженерной машины разграждения ИМР-2М и котлованных машин МДК-3 и МДК-2М.

Инженерная машина разграждения. Инженерная машина разграждения ИМР-2М [8] предназначена для выполнения работ, обеспечивающих продвижение войск через зоны разрушений при инженерном обеспечении боевых действий. ИМР-2М состоит из гусеничного шасси и рабочего оборудования, которое приводится в действие гидроприводом, пневмо- и электрооборудованием.

Гусеничное шасси [9] предназначено для монтажа на нем рабочего оборудования (рис. 1), которое включает универсальный бульдозер, полноповоротную телескопическую стрелу с манипулятором, ножевой колеино-минный трал, скребок-рыхлитель, механизм отбора мощности и редуктор привода насосов, электроустановку и коммуникационные устройства рабочего оборудования.

Насосная установка предназначена для питания гидросистемы рабочей жидкостью и включает в себя шесть насосов НШ-46У или НШ-50А-2, установленных на картере редуктора привода насосов. Одним из направлений развития системы приводов рабочих органов ИМР-2М является применение моноагрегатной насосной установки, состоящей из трех шестеренных насосов с приводом от одного вала: моноагрегат – группа $4 + 4 + 3$ необходимой комплектации объемом $150 + 100 + 50 \text{ см}^3$. Секция насоса объемом 150 см^3 обеспечивает работу приводов бульдозерного оборудования и колеино-минного трала, механизма укладки и поворота башни; секция насоса объемом 100 см^3 – стрелового оборудования с приводом подъема и выдвижения стрелы и привода подъема захвата; секция насоса объемом 50 см^3 – оборудования манипулятора с приводом клещей захвата и поворота захвата.

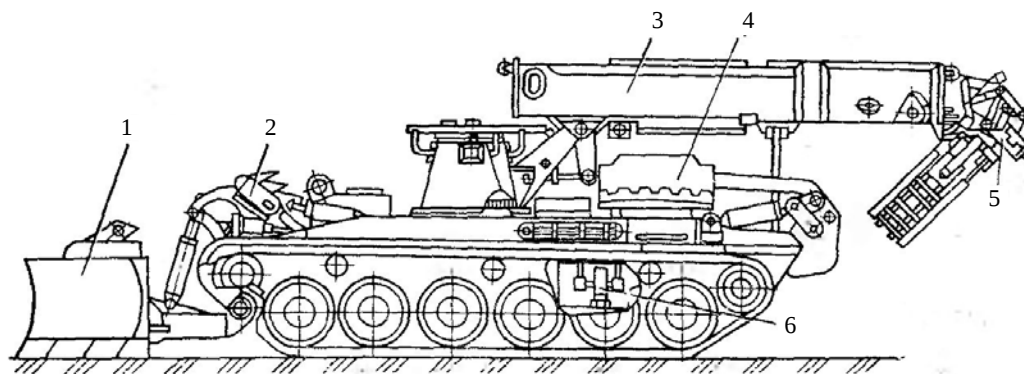


Рис. 1. Рабочее оборудование инженерной машины разграждения ИМР-2М: 1 – универсальный бульдозер; 2 – ножевой колеино-минный трал; 3 – полноповоротная телескопическая стрела; 4 – скребок-рыхлитель; 5 – манипулятор; 6 – редуктор привода насосов

Fig. 1. IMR-2M obstacle cleaning machine's labor equipment: 1 – bulldozer; 2 – knife-like track mine drag; 3 – full-circle telescopic boom; 4 – ripper's scraper; 5 – manipulator; 6 – hydraulic pump's driving gearbox

Насосный агрегат может быть произведен предприятиями Беларуси. Такой подход позволит отказаться от применения материалоемкого редуктора привода насосов при полном сохранении функциональности системы приводов рабочего оборудования.

Более глубокой модернизацией системы приводов рабочих органов ИМР-2М является применение насосной установки на базе одного насоса переменной производительности. Использование одного насоса упростит привод рабочих органов ИМР-2М и позволит поддерживать оптимальный режим работы при изменении условий нагружения рабочих органов. Авторами рекомендована насосная установка 22 (рис. 2) [10] производства ОАО «Пневмостроймашина» (Россия) [11], состоящая из насоса 25 марки 313.3.160 номинальным объемом 160 см³ и минимальным 0–40 см³. В блоке управления 24 заложена информация о режиме работы насоса при использовании всех рабочих органов и включении необходимой позиции каждого гидрораспределителя. Система управления обеспечивает работу насоса в оптимальном режиме.

Гидросистема инженерной машины разграждения обеспечивает управление:

- бульдозерным оборудованием: перевод отвала бульдозера в транспортное и полутранспортное положение гидроцилиндром 32, управляемым гидрораспределителем 31, и стопорение отвала бульдозера в транспортном положении гидроцилиндром 37, управляемым электромагнитным краном 36; позиционирование отвала бульдозера гидроцилиндрами 39, 40, управляемыми гидрораспределителем 38, и пе-

ревод отвала в плавающее положение гидрораспределителем 41; перекоп отвала бульдозера гидроцилиндрами 43, 44, управляемыми гидрораспределителем 42;

- стреловым оборудованием: позиционирование стрелы гидроцилиндром 16, управляемым гидрораспределителем 15, и перевод стрелы в плавающее положение гидрораспределителем 14, стопорение стрелы гидроцилиндром 7, управляемым электромагнитным краном 6; выдвижение, втягивание стрелы гидроцилиндром 13, управляемым гидрораспределителем 12; позиционирование стойки стрелы гидроцилиндром 28, управляемым гидрораспределителем 27;

- башней стрелового оборудования: поворот башни гидромотором 21, управляемым гидрораспределителем 19, и перевод башни в плавающее положение гидрораспределителем 20;

- захватом стрелы: позиционирование захвата стрелы гидроцилиндром 16, управляемым гидрораспределителем 15, и перевод захвата стрелы в плавающее положение гидрораспределителем 14; поворот захвата стрелы гидроцилиндрами 2, 3, управляемыми гидрораспределителем 1; раскрытие, закрытие захвата стрелы гидроцилиндром 5, управляемыми гидрораспределителем 4;

- колеино-минным тралом: перевод колеино-минного трала из походного положения в предрабочее и обратно гидроцилиндрами 34, 35, управляемыми гидрораспределителем 33;

- выдачей скребка-рыхлителя механизма укладки гидроцилиндром 30, управляемым гидрораспределителем 29.

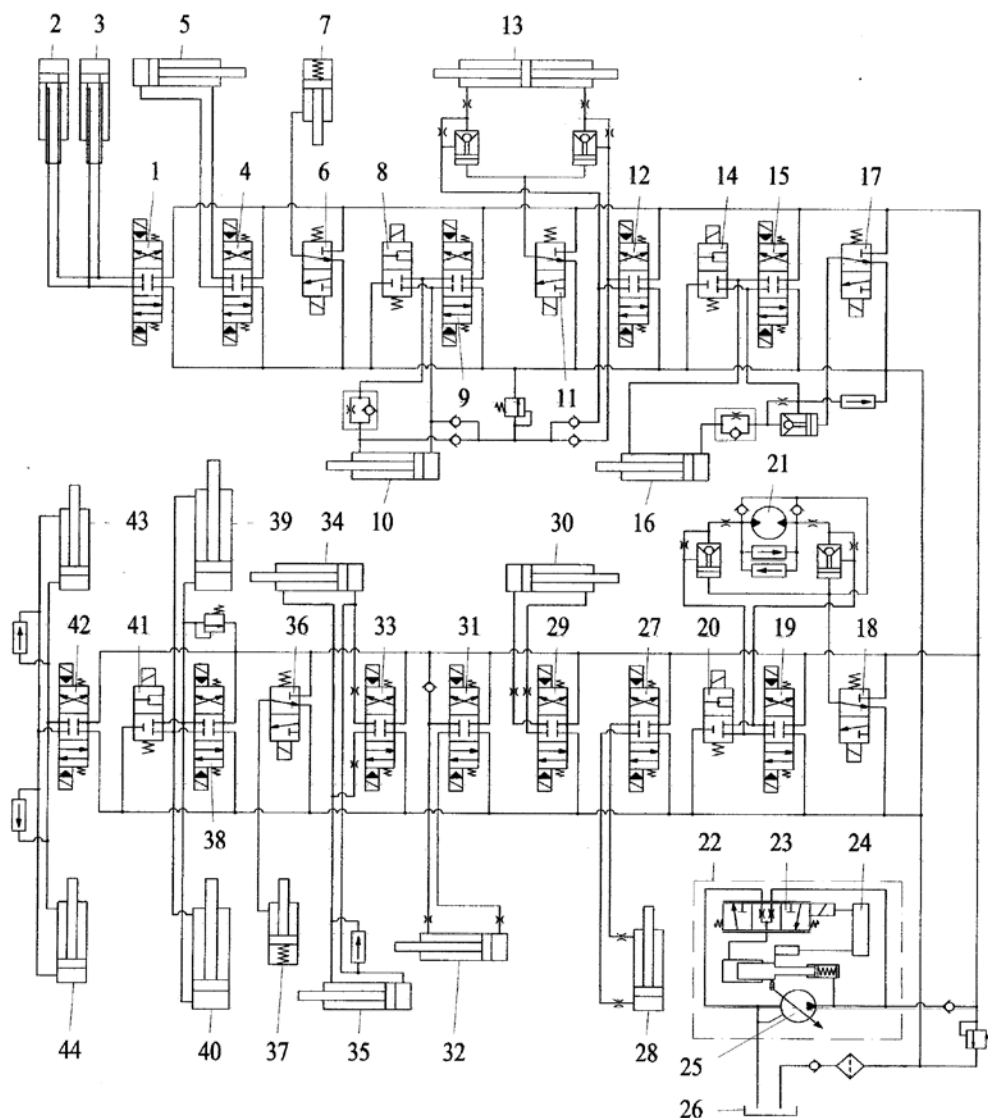


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированного гидропривода инженерной машины разграждения ИМР-2М:
 1, 4, 8, 9, 12, 14, 15, 19, 20, 23, 27, 29, 31, 33, 38, 41, 42 – гидрораспределитель;
 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 28, 30, 32, 34, 35, 37, 39, 40, 43, 44 – гидроцилиндр; 6, 11, 17, 18, 36 – электромагнитный кран;
 21 – гидромотор; 22 – насосная установка; 24 – блок управления; 25 – насос; 26 – бак

Fig. 2. Basic diagram for obstacle removing machine's modernized hydraulic system:

1, 4, 8, 9, 12, 14, 15, 19, 20, 23, 27, 29, 31, 33, 38, 41, 42 – flow distributors;
 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 28, 30, 32, 34, 35, 39, 40, 43, 44 – hydraulic actuators; 6, 11, 17, 18, 36 – electromagnetic valves;
 21 – hydraulic motor; 22 – pump unit; 24 – control unit; 25 – pump; 26 – oil tank

Модернизация системы приводов рабочих органов инженерной машины разграждения позволит отказаться от материалоемкого редуктора привода шести насосов. Применение насоса переменной производительности в составе системы приводов рабочего оборудования обеспечит возможность оптимизации режима работы оборудования при изменении внешних условий, повышая производительность при выполнении основных технологических операций.

Котлованная машина. На вооружении в частях инженерных войск используются котлованные машины МДК-3 и МДК-2М [8], предназначенные для отрывки котлованов под фортификационные сооружения и укрытия для техники при инженерном оборудовании позиций войск. По своим тактико-техническим характеристикам МДК-2М устарела, а МДК-3 соответствует современному уровню решения поставленных задач.

Котлованная машина МДК-3 (рис. 3) состоит из гусеничного транспортера [9] и рабочего оборудования, которое включает оборудование для отрывки котлованов, бульдозерное и рыхлительное оборудование, гидропривод (система управления рабочим оборудованием).

Котлованная машина МДК-2М состоит из базовой машины и рабочего оборудования. В состав рабочего оборудования входят: рабочий орган, трансмиссия рабочего органа, бульдозерное оборудование и гидропривод (система управления рабочим оборудованием). Основные инженерные решения рабочего оборудования бульдозера, рыхлителя и фрезы с метателем традиционные, применяемые в настоящее время.

Бульдозерное оборудование предназначено для послойной разработки и перемещения грунта при планировке дна котлована, подготовке площадки перед началом рытья котлована. Кроме того, с помощью бульдозерного оборудования можно производить засыпку котлованов, траншей, рыхление мерзлого грунта. Рабочий орган предназначен для разработки грунта в процессе отрывки котлована и транс-

портирования его в отвал. Он установлен в кормовой части машины и крепится к ней шарнирно с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Анализ систем приводов и управления рабочим оборудованием показывает сложность и материалоемкость трансмиссии рабочего органа, широкие возможности перевода системы управления рабочим оборудованием на современную элементную базу. При существенном удалении на машине механизмов отбора мощности двигателя на привод рабочего органа и самого рабочего органа от двигателя рациональным является использование гидравлического объемного привода рабочего органа [12]. Применение гидравлического привода рабочих органов МДК-3 позволяет отказаться от двух карданных валов, коробки скоростей, а МДК-2М – от промежуточного вала, двух карданных валов, поворотного редуктора и предохранительной муфты. Гидравлический мотор привода фрезы и метателя устанавливается на редуктор рабочего органа.

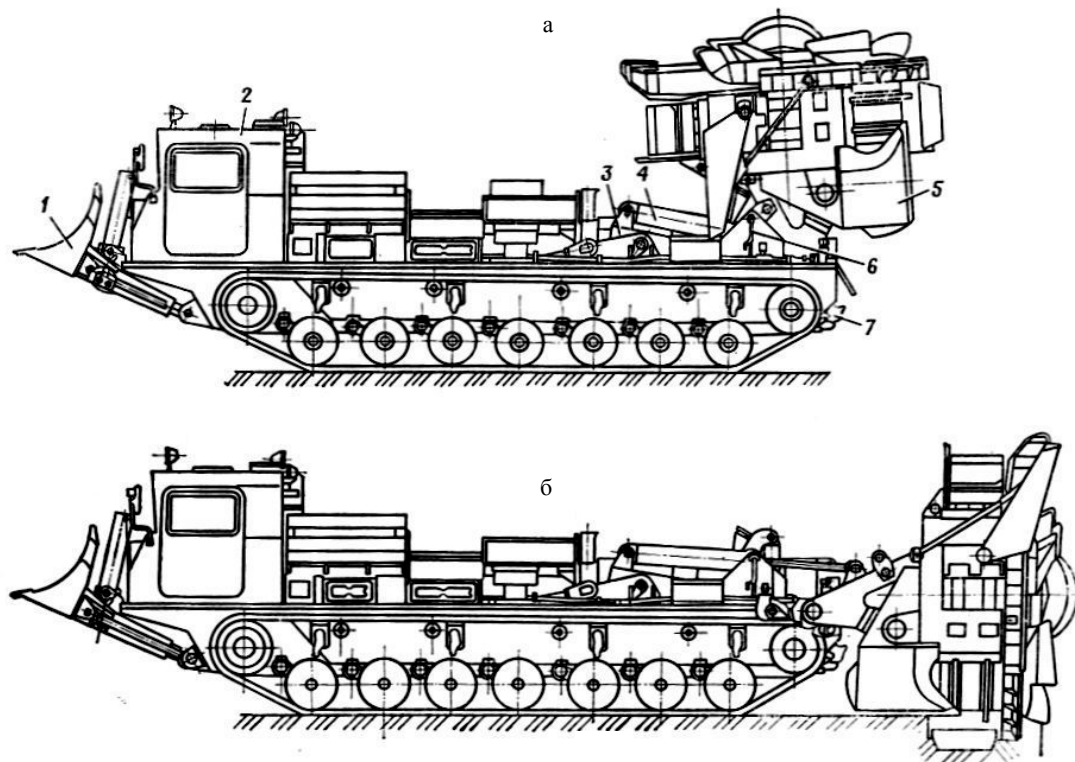


Рис. 3. Котлованная машина МДК-3 (компоновочная схема): а – транспортное положение; б – рабочее положение; 1 – бульдозерное оборудование; 2 – базовая машина; 3 – рама; 4 – гидроцилиндр поворота; 5 – рабочий орган; 6 – фиксатор рабочего органа; 7 – рыхлительное оборудование

Fig. 3. MDK-3 excavation machine (body layout): а – transporting position; б – working position; 1 – bulldozer; 2 – chassis; 3 – framework; 4 – labor equipment rotating actuator; 5 – labor equipment; 6 – labor equipment latch; 7 – scraper equipment

В рамках развития гидросистем котлованных машин МДК-3 и МДК-2М для привода фрезы и метателя может быть предложена насосная установка 1 (рис. 4), состоящая из регулируемого насоса 2 с наклонным блоком цилиндров серии 313 (313.3.160), предназначенного для работы в открытом контуре, и системы автоматического поддержания параметров работы насоса. Насос обеспечивает работу в диапазоне частот $400\text{--}1750\text{ мин}^{-1}$ при минимальном давлении на входе $0,08\text{ МПа}$ и до 2650 мин^{-1} при максимальном давлении на входе $0,20\text{ МПа}$. Масса насоса 55 кг , потребляемая номинальная мощность при номинальной частоте вращения 1200 мин^{-1} – 66 кВт . Для привода фрезы и метателя используется аксиально-поршневой гидромотор, устанавливаемый на редуктор рабочего органа, обеспечивающий деление потока мощности гидромотора на привод фрезы и метателя. Трансмиссия привода рабочего органа обеспечивает вращение фрезы в диапазоне частот $15,4\text{--}22,6\text{ мин}^{-1}$ у МДК-3 и $12,3\text{--}18,2\text{ мин}^{-1}$ – у МДК-2М, что при передаточном отношении редуктора рабочего оборудования фрезы, равном соответственно $87,514$ и 52 трансмиссий рабочих органов этих машин, требует диапазона частот вращения $1348\text{--}1978\text{ мин}^{-1}$ у МДК-3 и $640\text{--}950\text{ мин}^{-1}$ у МДК-2М гидромотора. Этим параметрам отвечает аксиально-поршневой гидромотор серии 310 (310.3.250), обеспечивающий работу в диапазоне частот $50\text{--}2100\text{ мин}^{-1}$. Масса гидромотора – 65 кг , номинальная мощность при частоте вращения 960 мин^{-1} – 75 кВт .

Для позиционирования бульдозерного оборудования и рабочего органа котлованной машины может быть применен один аксиально-поршневой насос 3 постоянной производительности серии 310 (310.3.56). Масса насоса 17 кг , потребляемая номинальная мощность 29 кВт . Редуктор включения и привода насосов должен быть переработан для установки двух названных насосов. Производитель насосов – ОАО «Пневмостроймашина».

При работе модернизированного гидропривода котлованных машин МДК-3 и МДК-2М насосы 2 и 3 (рис. 4) включаются при неработающем двигателе. Насос 3 подает рабочую жидкость к гидрораспределителям 8–11 (рис. 4а) и 8, 10 (рис. 4б), находящимся в исходном положении во второй позиции, соединяя напор-

ную магистраль насосного агрегата со сливом в бак.

Позиционирование отвала бульдозера осуществляется гидроцилиндрами 13, 14, управляемыми гидрораспределителями 8, 9. В котлованных машинах МДК-3 и МДК-2М гидрораспределители 8, 9 обеспечивают:

- опускание и заглубление отвала бульдозера при перемещении гидрораспределителей 8, 9 из второй позиции в первую (на рис. 4 – верхнюю). При этом рабочая жидкость насоса 3 подается в поршневые полости гидроцилиндров 13, 14 бульдозера. Вытесняемая из штоковых полостей гидроцилиндров 13, 14 рабочая жидкость поступает через сливные магистрали гидрораспределителей 8, 9 и фильтр в бак;

- подъем отвала бульдозера при перемещении гидрораспределителей 8, 9 из второй позиции в третью (на рис. 4 – нижнюю). Рабочая жидкость насоса 3 подается в штоковые полости гидроцилиндров 13, 14 бульдозера. Вытесняемая из поршневых полостей гидроцилиндров 13, 14 рабочая жидкость поступает через сливные магистрали гидрораспределителей 8, 9 и фильтр в бак.

В котлованной машине МДК-3 (рис. 4а) рабочие полости гидроцилиндров 13, 14 запорты гидрозамками. Управление гидроцилиндров 13, 14 гидрораспределителями 8, 9 позволяет перекашивать отвал, изменяя положение одного гидроцилиндра при запортом втором.

Перевод рабочего органа котлованной машины из транспортного положения в рабочее обеспечивается гидроцилиндрами 15, 16, управляемыми гидрораспределителем 10:

- подъем рабочего оборудования (метателя и рабочего органа) – при перемещении гидрораспределителя 10 из второй позиции в третью (на рис. 4 – нижнюю). При этом рабочая жидкость насоса 3 поступает в штоковые полости гидроцилиндров 15, 16 подъема-опускания рабочего оборудования; из поршневых полостей рабочая жидкость через дроссели, гидрораспределитель 10 и фильтр сливается в бак;

- опускание рабочего оборудования – при перемещении гидрораспределителя 10 из второй позиции в первую. Рабочая жидкость насоса 3 поступает в поршневые полости гидроцилиндров 15, 16; из штоковых полостей гидроцилиндров 15, 16 рабочая жидкость через дроссели, гидрораспределитель 10 и фильтр сливается в бак.

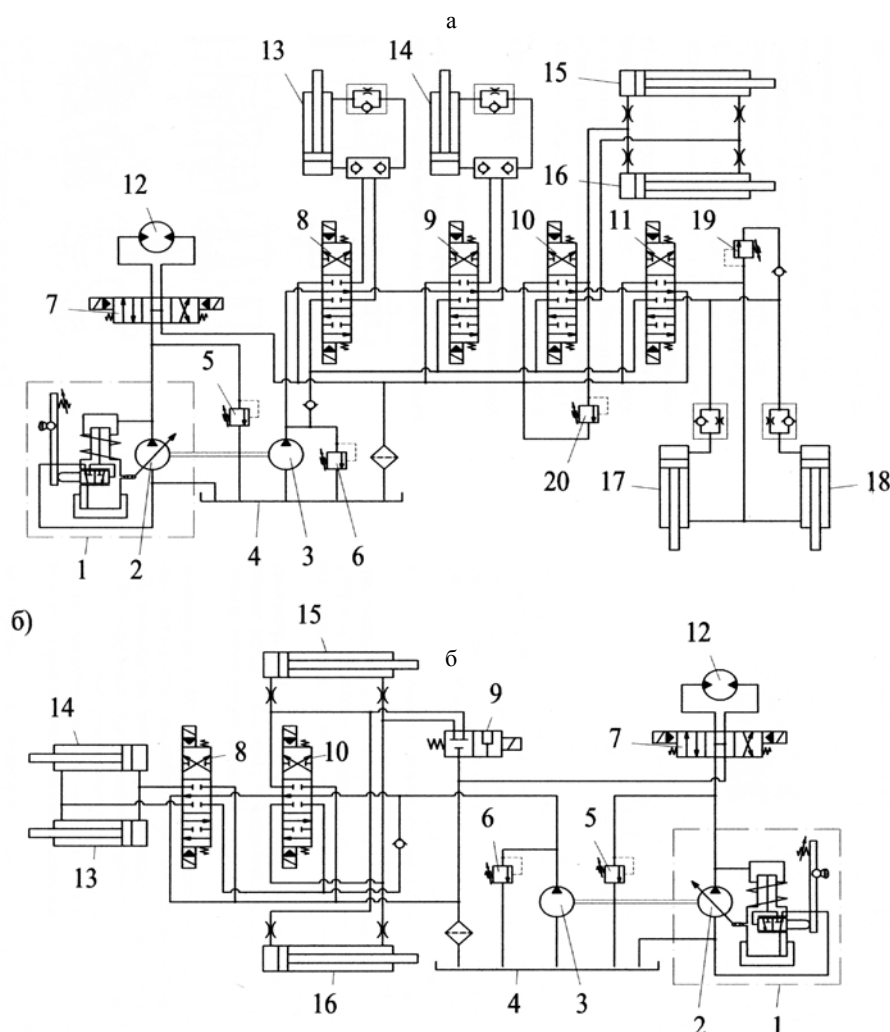


Рис. 4. Принципиальная схема модернизированного гидропривода рабочего оборудования котлованной машины:
а – МДК-3; б – МДК-2М; 1 – насосный агрегат; 2, 3 – регулируемый насос; 4 – бак; 5, 6, 19, 20 – клапан;
7–11 – гидрораспределитель; 12 – аксиально-поршневой гидромотор; 13–18 – гидроцилиндр

Fig. 4. Basic diagram for excavation machine's modernized hydraulic system:
а – MDK-3; б – MDK-2M; 1 – pumping unit; 2, 3 – pumps; 4 – oil tank; 5, 6, 19, 20 – valves;
7, 8, 9, 10, 11 – flow distributors; 12 – hydraulic motor; 13, 14, 15, 16, 17, 18 – hydraulic actuators

В котлованной машине МДК-3 (рис. 4а) заглубление рабочего органа обеспечивается гидроцилиндрами 17, 18, управляемыми гидрораспределителем 11:

- заглубление рабочего органа – при перемещении гидрораспределителя 11 из второй позиции в третью (на рис. 4 – нижнюю). При этом рабочая жидкость насоса 3 поступает в поршневые полости гидроцилиндров 17, 18; из штоковых полостей рабочая жидкость через гидрораспределитель 11 и фильтр сливается в бак;

- выглубление рабочего органа – при перемещении гидрораспределителя 11 из второй позиции в первую. Рабочая жидкость насоса 3

поступает в штоковые полости гидроцилиндров 17, 18; из поршневых полостей гидроцилиндров 17, 18 рабочая жидкость через дроссели, гидрораспределитель 11 и фильтр сливается в бак.

В котлованной машине МДК-2М (рис. 4б) заглубление рабочего органа осуществляется гидроцилиндрами 15, 16, управляемыми гидрораспределителем 10. При переводе гидрораспределителя 9 во вторую позицию поршневые и штоковые полости гидроцилиндров 15, 16 соединяются со сливом в бак, обеспечивая плавающее положение рабочему органу.

Клапан 6 ограничивает давление в напорной магистрали насоса 3. Клапан 20 ограничивает

давление в поршневых полостях гидроцилиндров 15, 16, а клапан 19 – в штоковых полостях гидроцилиндров 17, 18.

Для отрывки котлована при второй позиции гидрораспределителя 7 напорная магистраль насоса 2 связана со сливом в бак. Давление в напорной магистрали насоса 2 равно давлению в сливной магистрали, и насос автоматически переводится в режим холостого хода, уменьшая угол наклона блока цилиндров. При переводе гидрораспределителя 7 в первую позицию (на рис. 4 – левую) гидромотор подключается к напорной магистрали насоса 2, вращая фрезу и метатель. Давление в напорной магистрали увеличивается, и насос 2 переводится в заданный рабочий режим, обеспечивая необходимые параметры работы оборудования. При встрече рабочего органа с препятствием клапан 5 снижает динамическую нагрузку насоса 2. Реверсирование фрезы обеспечивается переводом гидрораспределителя 7 в третью позицию.

ВЫВОДЫ

1. Развитие систем приводов рабочего оборудования инженерной техники должно осуществляться в направлении использования гидравлических приводов рабочих органов на базе современной гидравлической аппаратуры.

2. Модернизация системы приводов рабочих органов инженерной машины разграждения позволит отказаться от материалоемкого редуктора привода шести насосов. Применение насоса переменной производительности в составе системы приводов рабочего оборудования обеспечит возможность оптимизации режима работы оборудования при изменении внешних условий, повышения производительности работы при выполнении основных технологических операций.

3. Применение гидравлического привода рабочих органов котлованных машин на базе современной гидравлической аппаратуры позволит отказаться от ряда материалоемких механических агрегатов в системе приводов рабочего оборудования, оптимизировать режим работы оборудования при изменении внешних условий, повысить производительность работы в процессе выполнения технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Леонович, И. И.** Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог: учеб. / И. И. Леонович, А. Я. Котлобай. – Минск: БНТУ, 2005. – 552 с.
2. **Строительные** машины: справ.: в 2 т. / А. В. Ранев [и др.]; под общ. ред. Э. Н. Кузина. – 5-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1: Машины для строительства промышленных, гражданских сооружений и дорог. – 496 с.
3. **Котлобай, А. Я.** Формирование направлений модернизации землеройных машин / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 54–59.
4. **Анализ** направлений и возможностей модернизации инженерной техники Вооруженных Сил / А. Я. Котлобай [и др.] // Наука и военная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 27–30.
5. **Коробкин, В. А.** Агрегаты дискретного действия гидроприводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 5. – С. 43–46.
6. **О перспективных** направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 71–76.
7. **Вавилов, А. В.** Создание приводов оборудования строительных и дорожных машин / А. В. Вавилов, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 9. – С. 35–41.
8. **Машины** инженерного вооружения. – Ч. I: Общая характеристика. Машины для преодоления разрушений и механизации земляных работ: учеб. для курсантов военных училищ инженерных войск / А. В. Ольшанский [и др.]; под ред. А. В. Ольшанского. – М.: Военное изд-во, 1986. – 422 с.
9. **Многоцелевые** гусеничные шасси / В. Ф. Платонов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1998. – 342 с.
10. **Гидравлическая** система привода рабочего оборудования инженерной машины разграждения: пат. 10143 Респ. Беларусь, МПК F 16H 61/40 (2010.01) / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело, Д. В. Сухарев, И. В. Зозуля; заявитель Белорусский государственный университет. – № u 20130925; заявл. 2013.11.13; опубл. 2014.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3.
11. **Караваев, В. А.** ОАО «Пневмостроймашина» – ведущее российское предприятие по проектированию, изготовлению и продаже аксиально-поршневых гидромашин / В. А. Караваев // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 6. – С. 5–8.
12. **Гидравлическая** система рабочего оборудования землеройной машины: пат. 9664 Респ. Беларусь, МПК F 16H 61/44 (2006.01) / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело, С. В. Григоренко; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № u 20130401; заявл. 2013.05.08; опубл. 2013.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5.

REFERENCES

1. **Leonovich, I. I.**, & Kotlobai, A. Ya. (2005) *Machines for Highway Construction, Repair and Maintenance*. Minsk: BNTU. 552 p. (in Russian).
2. **Rannev, A. V.**, Korelin, V. F., Zhavoronkov, A. V., Shlido, G. A., Makushkin, D. O., Timofeev, V. A., Telushkin, A. V., Erofeev, L. V., Viazovikin, V. N., Zaitsev, L. V., Nevzorov, L. A., & Kuzin, E. N. (1991) *Construction Machines: Reference Book: in 2 Volumes. Vol. 1: Machines for Construction of Industrial and Civil Buildings and Highways*. 5th Revised Edition. Moscow, Mashinostroenie. 496 p. (in Russian).
3. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., & Tamelo, V. F. (2013) Determinations of Directions Pertaining to Modernization of Earth-Digging Machines. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 5, 54–59 (in Russian).
4. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Shliakhtun, V. Iu., & Tamelo, V. F. (2014) Analysis of Directions and Possibilities for Modernization of Engineering Equipment of the Armed Forces. *Nauka i Voennaya Bezopasnost* [Science and Military Safety], 1, 27–30 (in Russian).
5. **Korobkin, V. A.**, Kotlobai, A. Ya., & Kotlobai, A. A. (2010) Digital Units for Hydraulic Drives of Construction and Road-Making Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 5, 43–46 (in Russian).
6. **Korobkin, V. A.**, Kotlobai, A. Ya., Kotlobai, A. A., & Tamelo, V. F. (2012) On Prospective Directions for Development of Hydraulic Drive Units in Construction and Road-Making Machines. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 6, 71–76 (in Russian).
7. **Vavilov, A. V.**, Kotlobai, A. Ya., & Kotlobai, A. A. (2014) Development of Equipment Drives for Construction and Road-Making Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 9, 35–41 (in Russian).
8. **Olshansky, A. V.**, Fedotov, N. F., Borodin, N. G., Trjanin, V. P., Gel'farb, A. I., Rzhetskij, V. A., Potapov, P. A., & Karavaenko, A. N. (1986) *Machines of Engineering Armament. Part I. General Description. Machines for Passing Through Demolitions and Mechanization of Earth Works*. Moscow, Military Publishing House. 422 p. (in Russian).
9. **Olshansky, A. V.** (1986) *Machines of Engineering Armament. Part I. General Description. Machines for Passing Through Demolitions and Mechanization of Earth Works*. Moscow, Military Publishing House. 422 p. (in Russian).
9. **Platonov, V. F.**, Korobkin, V. A., Kozhevnikov, V. S., & Platonov, S. V. (1998) *Multi-Purpose Tracked Chassis*. Moscow, Mashinostroenie. 342 p. (in Russian).
10. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Tamelo, V. F., Sukharev, D. V., & Zozulia, I. V. (2014) *Hydraulic Operating Drive System of Engineering Obstacle-Clearing Vehicle*. Patent Republic of Belarus No 10143 (in Russian).
11. **Karavaev, V. A.** (2000) JSC "Pnevmostroimashina" is a Leading Russian Enterprise on Designing, Manufacturing and Sale of Axial-Piston Hydraulic Machines. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny* [Construction and Road-Making Machines], 6, 5–8 (in Russian).
12. **Kotlobai, A. Ya.**, Kotlobai, A. A., Tamelo, V. F., & Grigorenko, S. V. (2013) *Hydraulic System for Operating Equipment of Excavation Machine*. Patent Republic of Belarus No 9664 (in Russian).

Поступила 24.12.2014

УДК 621.793.71

ВЫБОР ОКСИДОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Асп. ОКОВИТЫЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vasil_oka@inbox.ru

В статье проанализирован выбор оксидов и подробно описаны большинство оксидных систем, пригодных для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий с максимальным количеством тетрагональной фазы. Методика исследования основана на проведении обзора аналитической информации по современному состоянию теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов. Основным методом, используемым для нанесения теплозащитных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление. Положительные результаты получены также при электронно-лучевом и ионно-плазменном напылении, магнетронном распылении. Тем не менее преимущественное распространение плазменного напыления теплозащитных покрытий сохраняется прежде всего вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава.

Отмечено, что качественные теплозащитные покрытия необходимо формировать из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка. В качестве оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий выбраны оксиды иттербия и церия, а также рассмотрена оксидная система диоксида циркония «оксид гафния – оксид иттрия», которая представляет собой структуру, похожую на диоксид циркония.

Ключевые слова: диоксид циркония, теплозащитное покрытие, стабилизация, тетрагональная фаза.

Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

SELECTION OF OXIDES FOR STABILIZATION OF ZIRCONIUM DIOXIDE WHILE OBTAINING THERMAL BARRIER COATINGS

OKOVITY V. V.

Belarusian National Technical University

The paper analyzes selection of oxides and describes in details a majority of oxide systems which are applicable for stabilization of zirconium dioxide while obtaining thermal barrier coatings with maximum amount of tetragonal phase. Methodology of investigation is based on a review of analytical information on the current state of thermal barrier coatings on the basis of zirconium dioxide stabilized by oxides of rare-earth metals. The method used for application of zirconium dioxide thermal barrier coatings is plasma spraying. Positive results have been also obtained while applying e-beam sputtering, ion-plasma deposition and magnetron sputtering. Nevertheless preferred plasma spraying application for thermal barrier coatings still continues due to its high productivity and versatility that permits to deposit metallic and ceramic materials of the ordered chemical and phase composition.

Ytterbium and cerium oxides have been selected as oxides for stabilization of zirconium dioxide in order to obtain thermal barrier coatings. The paper also considers an oxide system of zirconium dioxide: "hafnium oxide – yttrium oxide", representing in itself the structure which is similar to zirconium dioxide.

Keywords: zirconium dioxide, thermal barrier coating, stabilization, tetragonal phase.

Fig. 5. Ref.: 12 titles.

Введение. Рабочая температура деталей и узлов газотурбинных двигателей последнее десятилетие характеризуется тенденцией роста (более 1150 °С), что, в свою очередь, позволяет повысить мощность установок и коэффициент полезного действия. В качестве материалов для керамического слоя теплозащитных покрытий (ТЗП) наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидами редкоземельных металлов (ЧСЦД) [1–6]. Это обусловлено рядом его свойств: низким коэффициентом теплопроводности λ (0,6–1,3 Вт/(м · К)) и сравнительно высоким коэффициентом термического линейного расширения α ((6–13) · 10⁻⁶ град⁻¹), соизмеримым с коэффициентами для жаропрочных сплавов на основе Ni и Co ((15–17) · 10⁻⁶ град⁻¹), возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики. В частности, цирконий и цирконаты щелочноземельных металлов имеют близкие с ЧСЦД физические свойства, однако их применение ограничено недостаточно высокими механическими свой-

ствами. Основным методом, используемым для нанесения теплозащитных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление (до 90 % разработок) [2–4]. Положительные результаты получены также при электронно-лучевом и ионно-плазменном напылениях, магнетронном распылении. Тем не менее преимущественное распространение плазменного напыления ТЗП сохраняется, прежде всего, вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава. В общем случае ТЗП представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслой, внешний керамический слой и переходные керамические слои [2–5]. Основной причиной разрушения плазменных ТЗП являются термомеханические напряжения, возникающие при теплосменах в двигателях вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения

усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое. Значительная структурная чувствительность свойств покрытий на основе диоксида циркония требует строгой воспроизводимости результатов. Это накладывает особо жесткие ограничения на качество используемых материалов и точность поддержания технологических режимов нанесения покрытия. Улучшение свойств теплозащитных покрытий осуществляется также и посредством изменения структуры керамического слоя теплозащитного покрытия, создания градиентных слоев. Градиентные слои совмещают термостойкость керамики с пластичностью металлов. Постепенное изменение микроструктуры без резких границ раздела, плавное изменение микротвердости и сближение модулей упругости керамического и металлического слоев приводят к увеличению прочности ТЗП и его долговечности.

Оксиды для стабилизации диоксида циркония и оксида гафния при получении теплозащитных покрытий. В чистом виде диоксид циркония ZrO_2 существует в трех модификациях: кубической (высокотемпературная), тетрагональной (промежуточная) и моноклинной (низкотемпературная). При нагревании до 1220–1470 К начинается переход моноклинной формы в тетрагональную. При охлаждении наблюдается гистерезис, обусловленный тем, что моноклинная форма (m) проявляется лишь при 1240 К, а тетрагональная (t) исчезает при 1020 К [1–6]. Переход тетрагональной модификации чистого диоксида циркония в кубическую происходит при 2570–2640 К. Кубический ZrO_2 стабилен до точки плавления, равной 2870 К. Кубический ZrO_2 имеет границен-

трированную решетку флюорита, в которой каждый ион Zr^{4+} окружен восемью ионами кислорода, образующими два одинаковых четырехугольника (рис. 1). В тетрагональной модификации ион Zr^{4+} также имеет координационное число 8, однако четыре иона кислорода, находящиеся на расстоянии 2,065 Å от иона циркония, образуют правильный четырехугольник, а четыре (на расстоянии 2,455 Å) – правильный четырехугольник, повернутый под углом 90° по отношению к первому (рис. 2) [7–9]. В моноклинной модификации ион Zr^{4+} имеет координационное число 7, а ионы кислорода расположены в одной плоскости. Четыре из них находятся на расстоянии 2,21 Å, а три – на 2,07 Å от иона Zr^{4+} . Один из углов кристаллической подрешетки, образуемый ионами циркония, существенно отличается от прямого (рис. 3): угол $\beta + 81,22^\circ$ (при 1220 К). Описанные типы решеток диоксида циркония полностью не исчерпывают возможные изменения его структуры. Известно, в частности, о существовании при высоких давлениях орторомбической модификации (рис. 4), а также о модификациях тетрагональной высокобарной фазы (рис. 5) [9, 10]. Диоксиду циркония свойственно фазовое мартенситное превращение тетрагональной модификации в моноклинную и обратно ($t - m$). Мартенситное ($t - m$)-превращение происходит в интервале температур 1170–1420 К и сопровождается увеличением объема на 3–7 % в зависимости от содержания примесей и методов получения исходного материала. В ряде случаев, например при использовании материалов на основе диоксида циркония для создания термобарьерных слоев, особенности фазового перехода ($t - m$) применяются для повышения термической стабильности и стойкости к термоциклированию.

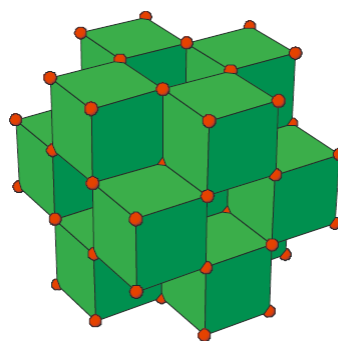
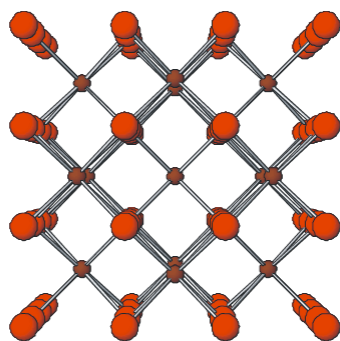


Рис. 1. Структура решетки кубической модификации ZrO_2

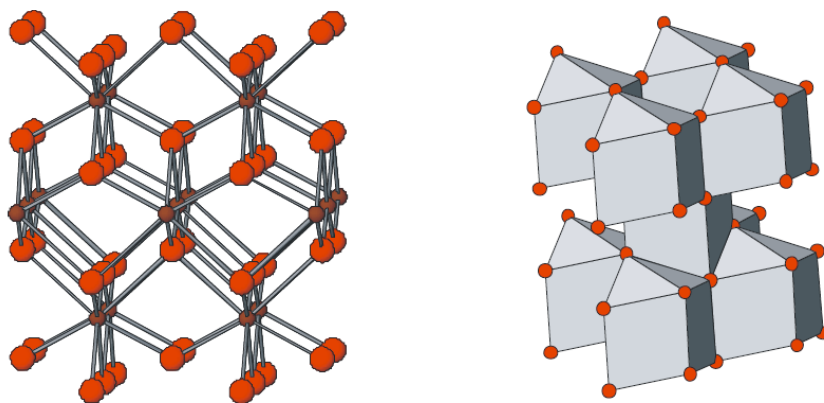


Рис. 2. Строение решетки тетрагональной модификации ZrO_2

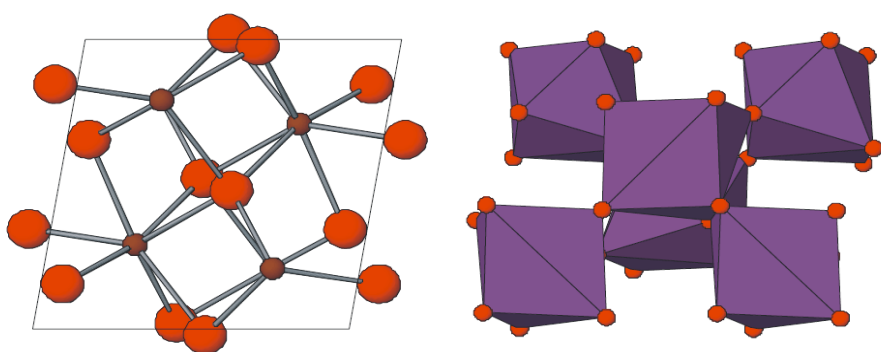


Рис. 3. Строение решетки моноклинной модификации ZrO_2

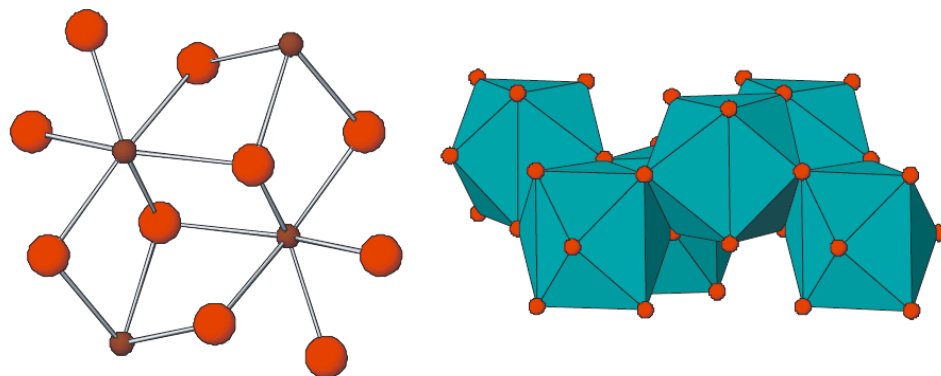


Рис. 4. Строение решетки орторомбической модификации ZrO_2

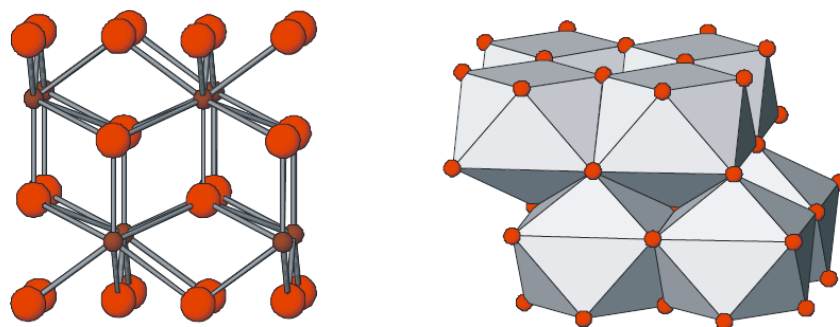


Рис. 5. Строение решетки тетрагональной высокобарной модификации ZrO_2

Добавление к ZrO_2 стабилизирующих кубическую решетку оксидов MgO , CaO , Y_2O_3 , Yb_2O_3 , CeO_2 , HfO_2 расширяет область стабильности кубической кристаллографической формы оксида циркония от точки плавления до комнатной температуры. Это позволяет избежать изменений объема, связанного с фазовыми превращениями. Следует заметить, что для стабилизации диоксида циркония легирующий оксид должен не только иметь соответствующий размер иона металла, но и образовывать твердый раствор с диоксидом циркония. Это условие резко ограничивает число возможных стабилизаторов. Фактически такая стабилизация возможна только оксидами редкоземельных металлов (Y_2O_3 , Yb_2O_3 , CeO_2 , HfO_2) [10–12]. Отрицательное влияние повышенного содержания стабилизаторов в исходном порошке на долговечность покрытий объясняется несколькими причинами. Во-первых, исходные порошки имеют, как правило, неравномерное распределение стабилизатора по сечению, что наследуется в структуре покрытия. Во-вторых, наряду с выделениями богатых стабилизатором фаз типа $Zr_3Y_4O_{12}$, $Zr_3Yb_4O_{12}$ в покрытии формируются зерна тетрагональной фазы составов $ZrO_2 - 8,3\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 12,3\% Yb_2O_3$ и превращенные в моноклинную фазу зерна составов $ZrO_2 - 1,6\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 6,2\% Yb_2O_3$. Сегрегация стабилизатора в покрытии особенно заметно усиливается при его термообработке либо термоциклировании в случае стабилизации оксида циркония, что еще более усугубляет фазовую неоднородность покрытия. В-третьих, стабильность тетрагональной фазы во многом зависит от размера зерна фазовых включений, повышаясь с их уменьшением, что особенно заметно при размере зерна менее 1 мкм, поэтому достижение необходимого размера фазовых включений является задачей оптимизации технологии получения керамических порошков для теплозащитных покрытий.

По указанным причинам достижение равномерного химического и фазового состава по сечению исходных порошков и покрытия с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений является одной из основных задач техники плазменного напыления ТЗП. Характеристики плазменных ТЗП зависят как от вида

и состояния исходного порошка, так и, собственно, от технологических параметров напыления. В большинстве исследований влияния технологии плазменного напыления на долговечность покрытия отмечается, что вид и состояние исходного порошка для напыления оказывают решающее воздействие на качество напыленных покрытий из ЧСДЦ. Важное значение для получения качественных ТЗП имеет химическая чистота применяемых материалов. Известно, в частности, что оксид кремния SiO_2 дестабилизирует высокотемпературные фазы ZrO_2 . Учитывая неизбежную сегрегацию более легкоплавкого оксида кремния по границам зерен и на поверхности частиц порошка ZrO_2 , SiO_2 следует рассматривать как весьма нежелательную примесь. Термическая стабильность тетрагональной фазы ZrO_2 снижается с увеличением содержания межкристаллитной влаги в порошке. Кроме того, присутствие влаги ухудшает нагрев порошка в плазменной струе и делает его неоднородным. Существенное влияние на долговечность покрытий оказывает размер частиц исходного порошка. С одной стороны, увеличение среднего размера частиц порошка вызывает рост пористости покрытия и соответственно увеличивает сопротивление термоудару. Формирующиеся крупные поры приводят к торможению движения трещин. С другой стороны, крупные частицы хуже проплавляются в плазменной струе, что ведет к неравномерности фазового состава и снижению прочности межчастичных контактов в покрытии. Важным параметром является также форма частиц порошка. В частности, применение сферических порошков более предпочтительно, так как в покрытии формируются главным образом округлые поры, а прогрев порошка осуществляется более равномерно, что особенно важно для материалов с низкой теплопроводностью. Кроме того, с развитой поверхности порошков хуже абсорбируется влага, что отрицательно влияет на качество ТЗП.

Диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттербия, был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий вместо диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия по следующей причине. У иттербия тривалентный ионный радиус (0,858 Å) значительно

меньше, чем тривалентный ионный радиус иттрия ($0,893 \text{ \AA}$), и более приближен к тривалентному ионному радиусу циркония. Известно, что большие катионы вносят большие искажения в решетку ZrO_2 и требуют большего количества вакансий и более высокой температуры для образования тетрагональной фазы ZrO_2 , которая оказывает основное влияние на теплозащитные свойства. Следовательно, в системе $\text{ZrO}_2\text{--Yb}_2\text{O}_3$ должен быть меньший уровень внутренних напряжений по сравнению с любыми другими системами $\text{ZrO}_2\text{--R}_2\text{O}_3$ (где R – редкоземельный элемент). Вследствие вышеизложенного сделано предположение, что использование оксида иттербия Yb_2O_3 в порошках частично стабилизированного диоксида циркония позволит получать ТЗП с ресурсом, превышающим ресурс $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ покрытия. Теплозащитное покрытие $\text{ZrO}_2\text{--Yb}_2\text{O}_3$ показало превосходные теплозащитные свойства при температурах до 1100°C . Однако при более высоких температурах эти сплавы характеризуются относительно низкой стойкостью к коррозионному воздействию продуктов сгорания топлива и высокотемпературному окислению в условиях повышенных рабочих температур. Поэтому необходимо исследовать другие оксиды редкоземельных элементов, отличных от оксида иттербия, для получения ТЗП, работающих при температурах выше 1150°C в условиях горячей коррозии или в присутствии солей ванадия. В ряду стабилизаторов CeO_2 , HfO_2 , Yb_2O_3 , Y_2O_3 наиболее стабильным и долговечным является оксид церия CeO_2 – ЧСДЦ покрытия при термоциклировании в условиях нагрева выше 1150°C . Максимальное сопротивление термоусталости достигается при 22–24 % CeO_2 . В случае формирования таких материалов спеканием оптимальное содержание стабилизатора в исходных порошках превышает концентрацию, которая требуется для фиксации равновесной тетрагональной фазы ZrO_2 , играющей наиболее важную роль при получении ТЗП с высоким сопротивлением термической усталости. Кроме того, теплозащитные покрытия $\text{ZrO}_2\text{--CeO}_2$ по сравнению с ТЗП на основе $\text{ZrO}_2\text{--Yb}_2\text{O}_3$ и $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ обладают повышенной температурной стабильностью, вязкостью разрушения и лучшей тепловой изоляцией.

Оксид гафния HfO_2 был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий наряду с диоксидом циркония ввиду их сходства в структурной модификации, решетке, химических и физических свойствах и его повышенной температуры структурных преобразований. Сходство Hf^{+4} - и Zr^{+4} -катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке. Отличия кристаллических решеток ZrO_2 и HfO_2 очень малы в связи с эквивалентной валентной зоной и почти эквивалентными ионными радиусами Zr^{+4} и Hf^{+4} . По этой причине в системе $\text{ZrO}_2\text{--HfO}_2$ могут образовываться непрерывные растворы замещения, и можно выделить рентгеновские дифракционные картины ZrO_2 , HfO_2 в твердых растворах только с помощью чрезвычайно высокого разрешения рентгеновского дифракционного метода. Сходство между $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ и $\text{HfO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ в равновесных фазовых диаграммах распространяется также на образование неравновесных фаз. Все рассмотренные составы диоксида гафния, частично стабилизированные оксидом иттрия, при быстром охлаждении показывают одну метастабильную t' -фазу с микроструктурой, эквивалентной чистой t' -фазе. Кроме этого, температура фазового превращения при переходе тетрагональной фазы в моноклинную с увеличением концентрации Y_2O_3 уменьшается, а при увеличении концентрации HfO_2 – увеличивается, что делает систему $\text{HfO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ перспективной для получения ТЗП с заданными свойствами.

ВЫВОД

На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что качественные теплозащитные покрытия необходимо формировать из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка. В качестве оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий выбраны оксиды

иттербия и церия, а также рассмотрена оксидная система «диоксид циркония – оксид гафния – оксид иттрия», которая представляет собой структуру, похожую на диоксид циркония.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Влияние** метода синтеза на свойства порошков частично стабилизированного диоксида циркония / В. А. Дубок [и др.] // Порошковая металлургия. – 1998. – № 8. – С. 56–60.
2. **Khor, K. A.** Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr ALY Composite Coatings / K. A. Khor, Y. W. Gu, Z. L. Dong // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. Thermal Spray Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference. – Montreal, QUE, 2000. – P. 1241–1248.
3. **Porter, D. L.** Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PS2) / D. L. Porter, A. H. Heuer // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Vol. 6, No 3. – P. 183–184.
4. **Singheiser, L.** The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests / L. Singheiser // 1st Plasma Technic. Symposium Lucerne. – 1998. – Vol. 2. – P. 164–173.
5. **Robert, M.** Mikrostructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal ZrO₂ / M. Robert // The American Ceramic Society. – 1997. – Vol. 10, No 4. – P. 214–220.
6. **Оковитый, В. А.** Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 1998. – Вып. 21. – С. 101–105.
7. **Оковитый, В. А.** Разработка теплозащитных плазменных покрытий / В. А. Оковитый // Сварка и родственные технологии. – 2005. – Вып. 7. – С. 80–82.
8. **Оковитый, В. А.** Оптимизация процесса нанесения ZrO₂–Y₂O₃ / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 2007. – Вып. 30. – С. 245–249.
9. **Математическая** модель тепловых процессов, происходящих при формировании покрытий на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2009. – Вып. 32. – С. 9–20.
10. **Моделирование** порообразования при формировании теплозащитных плазменных покрытий на основе диоксида циркония / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2011. – Вып. 34. – С. 36–40.
11. **Создание** градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттербия / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник БНТУ. – 2011. – Вып. 6. – С. 5–9.
12. **Теплозащитные** покрытия на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.

REFERENCES

1. **Dubok, V. A.**, Kabanova, M. I., Nedil'ko, S. A., & Panchenko, G. V. (1998) Influence of Synthesis Method on Pow-

der Properties Of Partially Stabilized Zirconium Dioxide. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy], 8, 56–60 (in Russian).

2. **Khor, K. A.**, Gu, Y. W., & Dong, Z. L. (2000) Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr ALY Composite Coatings. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. Thermal Spray Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference. Montreal, QUE, 1241–1248.

3. **Porter, D. L.**, & Heuer, H. A. (2006) Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PS2). *Journal of the American Ceramic Society*, 6 (3), 183–184. Doi: 10.1111/j.1151-2916.1977.tb15509.x.

4. **Singheiser, L.** (1998) The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests. *1st Plasma Technic. Symposium Lucerne*, 2, 164–173.

5. **Robert, M.** (1997) Microstructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal ZrO₂. *The American Ceramic Society*, 10 (4), 214–220.

6. **Okovity, V. A.** (1998) Influence of Technological Parameters of TBC Ceramic Layer on Resistance to Thermal Cycling. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovedstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 21, 101–105 (in Russian).

7. **Okovity, V. A.** (2005) Development of Thermal Barrier Plasma Coatings. *Svarka i Rodstvennye Tekhnologii* [Welding and Related Technologies], 7, 80–82 (in Russian).

8. **Okovity, V. A.** (2007) Optimization of ZrO₂–Y₂O₃ Depositing Process. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovedstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 30, 245–249 (in Russian).

9. **Il'iushchenko, A. F.**, Okovity, V. A., Gromyko, G. F., Shevtsov, A. I., Panteleenko, F. I., Matsuka, N. P., & Okovity, V. V. (2009) Mathematical Model of Thermal Processes Occurring During Formation of ZrO₂-Based Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovedstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 32, 9–20 (in Russian).

10. **Il'iushchenko, A. F.**, Kusin, R. A., Cherniak, I. N., Kusin, A. R., Zhegzdrin', D. I., Manoilov, E. D., & Kaptsevich, V. M. (2011) Simulation of Pore Formation While Developing Thermal Barrier Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovedstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 34, 36–40 (in Russian)

11. **Okovity, V. A.**, Panteleenko, F. I., Devoino, O. G., Okovity, V. V., Sobolevsky, S. B., & Shevtsov, A. I. (2011) Development of Gradient Plasma Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide Stabilized with Yttrium Oxide. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 6, 5–9.

12. **Il'iushchenko, A. F.**, Ivashko, V. S., Okovity, V. A., & Sobolevsky, S. B. (1998) *Thermal Barrier Coatings on ZrO₂-Basis*. Minsk, Remika, 128 p. (in Russian).

Поступила 14.10.2014

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Асп. МОЙСЕЙЧИК А. Е., докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vasilevich@bsu.by

Целью настоящей статьи является установление зависимости между теплообразованием и сопротивлением деформированию конструкционной стали. На основании приведенных данных допустили, что при упругопластическом деформировании конструкционной стали теплообразование и повышение температуры поверхности изделия являются результатом физико-химического взаимодействия дислокаций и атомов примесей в полосах скольжения. Взаимозависимость теплообразования и упругопластического деформирования экспериментально подтверждена в серии экспериментов по растяжению пластин из низкоуглеродистой стали. В процессе деформирования интенсивность и скорость деформаций – основные факторы, определяющие локальный разогрев материала в очаге предразрушения, а температура напрямую влияет на скорость протекания диффузионных процессов и изменение физико-механических характеристик материала в зоне предразрушения. Согласно проведенным экспериментам, для низкоуглеродистой стали ВСт3сп при квазистатическом растяжении средняя температура разогрева зоны предразрушения составляет примерно 20–90 °С. Приведены данные процесса деформации стальных пластин, свидетельствующие о том, что упругопластическое деформирование сопровождается деформационным теплообразованием, а зарождение трещины является термомеханическим процессом. Теплота образуется в полосах сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Температура поверхности в зоне зарождения трещины достигала в стадии долома 88 °С.

С использованием понятия «поверхностная энергия» и формулы Лапласа выведена формула Давиденкова – Спиридоновой, определяющая сопротивление деформированию растянутого круглого стального стержня в стадии образования шейки, показана ее зависимость от деформационного теплообразования.

Ключевые слова: теплообразование, сопротивление деформированию, конструкционная сталь, эффекты люминесценции.

Ил. 3. Библиогр.: 12 назв.

HEAT GENERATION AND RESISTANCE TO DEFORMATION OF STRUCTURAL STEEL

MOYSEYCHIK A. E., VASILEVICH Yu. V.

Belarusian National Technical University

The purpose of this paper is to determine dependence between heat generation and resistance to deformation of structural steel. It has been assumed on the basis of the represented data that in the course of deformation of structural steel physico-chemical interactions of dislocations and impurity atoms occurring in the slip bands result in heat generation and temperature increase of product surface. Interdependence of heat generation and elastic-plastic deformation has been experimentally proved by set of experiments on low-carbon steel plate extension. In the case of deformation its intensity and rate are considered as main factors that determine local material heating in the pre-fracture nucleus and temperature directly exerts its influence on diffusion processes and changes in physical and mechanical characteristics of the material in the pre-fracture nucleus. The obtained average heating temperature for the pre-fracture nucleus is equal approximately 20–90 °C for low-carbon steel ВСт3сп while using quasi-static extension. The paper presents data pertaining to steel plate deformation that point to the fact that elastic-plastic deformation is accompanied by deformation heat generation and a crack initiation is caused by thermo mechanical process. Heat is formed in the slip bands and their direction corresponds to the maximum shearing stresses. Surface temperature in the zone of crack initiation has reached 88 °C in the pre-fracture stage.

The Davidenkov – Spiridonova formula has been derived while using a concept of “surface energy” and Laplace's formula. This formula makes it possible to determine resistance to deformation of a stretched round steel rod in the stage of neck formation. The paper shows formula's dependence on the deformation heat generation.

Keywords: heat generation, deformation resistance, structural steel, luminescence effects.

Fig. 3. Ref.: 12 titles.

Введение. Экспериментально доказано, что деформирование конструкционных сталей происходит с охлаждением или нагревом рабочих объемов материала [1]. При этом в результате деформаций различной природы активация процессов рождения, взаимодействия и аннигиляции дефектов внутри материала сопровождается эмиссией частиц и света (электронов, ионов, атомов, кластеров и фотонов) [2]. Эффекты люминесценции проявляются и при других воздействиях на металлы, при которых развивается быстропотекающее искажение кристаллической решетки [2, 3]. В результате теплопроводности происходит соответствующее изменение температуры поверхности деформируемого изделия, что позволяет по данным измерения поверхностной температуры изделия эффективно контролировать процесс зарождения и развития дефектов в опасных объемах изделия [4]. С использованием метода пузырьков О. В. Клявин в [5] выявил особенности элементарных актов деформирования в кристаллах при криогенных температурах и подтвердил микронеоднородность процесса деформирования и наличие локального нагрева в полосах скольжения кристаллов. Автор [5] пришел к следующим выводам. Во всех опытах время начала появления пузырьков совпадало с диаграммным пределом текучести образцов. Суммарная энергия дислокаций в полосах, вышедших на поверхность кристалла, примерно на четыре порядка меньше работы, затраченной на образование самой полосы скольжения и выделяемой в основном в виде теплоты. Нагретыми областями кристалла являлись винтовые и краевые полосы скольжения, а также места пересечения обоих типов полос. Непрерывное выделение пузырьков гелия в [5] наблюдалось в местах пересечения краевых полос скольжения, где возникали и раскрывались микротрещины. На винтовых полосах скольжения отмечено большее количество пузырьков [5], чем на краевых. На краевых полосах скольжения пузырьки имели меньшие размеры, образовывались рядами по несколько штук под углом 45° к оси образца и в месте зарождения не задерживались и всплывали после возникновения. Расположение пузырьков проявляет функционирующие полосы скольжения как источники теплообразования в кристаллах.

Целью исследований авторов статьи являлось установление зависимости между теплообразованием и сопротивлением деформированию конструкционной стали. При упругом растяжении стального изделия температура на поверхности понижается, а при сжатии повышается. Из термодинамических процессов для упругой стадии работы материалов получено, что изменение температуры при деформировании пропорционально соответствующему изменению первого инварианта тензора напряжений [6]

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{TK_m}, \quad (1)$$

где ΔT – изменение поверхностной температуры изделия при упругом деформировании; $\Delta\sigma$ – то же суммы главных напряжений; T – температура материала; K_m – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности.

Экспериментальная проверка формулы (1), выполненная авторами [7] с использованием термографирования, тензометрирования и конечно-элементного расчета, показала хорошую сходимость результатов. Для низкоуглеродистой стали $K_m = 3,32 \cdot 10^{-6}$ МПа [7].

Изложенное выше и данные экспериментов [8] позволяют допускать, что при упруго-пластическом деформировании конструкционной стали теплообразование и повышение температуры поверхности изделия являются результатом физико-химического взаимодействия дислокаций и атомов примесей в полосах скольжения. Взаимозависимость теплообразования и упругопластического деформирования экспериментально подтверждена авторами данной статьи в серии экспериментов по растяжению пластин из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп толщиной 6–18 мм с боковыми парными надрезами. Начальную кривизну в основании надреза задавали 3,4 и 5,0 мм. Образцы квазистатически нагружали на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка – удлинение». Процесс деформирования образцов отображался в термофильме с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000». Обработку результатов выполняли в программном пакете IRTIS. Кадры термофильма загрузки одного из таких образцов, свидетельствующие о том, что упругопластическое деформирование сопровождается деформаци-

онным теплообразованием, а зарождение трещины является термомеханическим процессом, показаны на рис. 1. Теплота образуется в полосах сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Температура поверхности в зоне зарождения трещины достигала в стадии долома 88 °С.

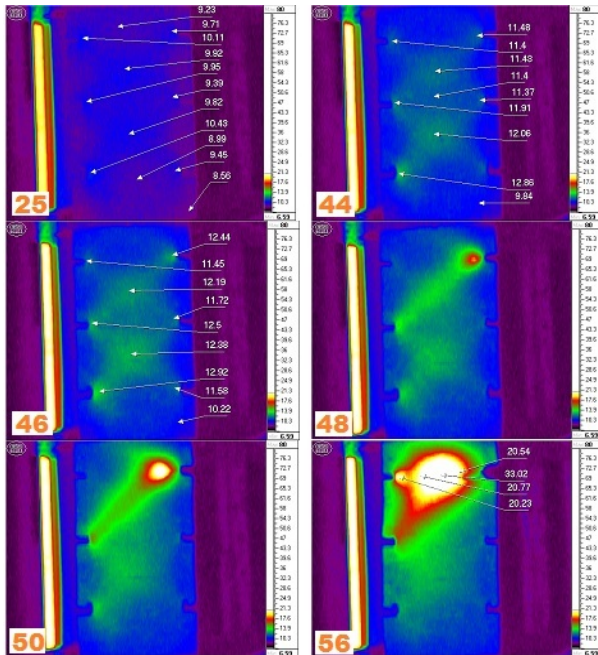


Рис. 1. Кадры термофильма растяжения образца № 13.9:
 кадр 25: $T_{\max} = 20,13$ °С; $T_{\min} = 7,13$ °С; $\theta = 76,82$ с;
 кадр 44: $13,01$ °С; $7,40$ °С; $102,4$ с;
 кадр 46: $13,43$ °С; $7,42$ °С; $107,0$ с;
 кадр 48: $20,97$ °С; $7,01$ °С; $111,7$ с;
 кадр 50: $23,46$ °С; $7,45$ °С; $116,4$ с;
 кадр 56: $33,57$ °С; $7,52$ °С; $130,3$ с

Моделирование сопротивления деформированию феррито-перлитной стали. Условно выделим перлитное зерно, состоящее из чередующихся полосок цементита толщиной Δ_c и полосок феррита толщиной Δ_f . При этом $\Delta_c + \Delta_f = \Delta_p$ – межпластинчатое расстояние. Используя принцип аддитивности, несложно получить, что такое зерно проявит сопротивление деформированию в соответствии с выражением

$$\sigma_p = \frac{\sigma_c}{\Delta_p} \left[1 - (1 - \Delta_p) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right], \quad (2)$$

где σ_p , σ_f , σ_c – сопротивление деформированию перлита, феррита и цементита.

Далее рассмотрим участок феррито-перлитной стали площадью

$$A_s = A_p + A_f = n_p A_s + n_f A_s = n_p A_s + (1 - n_p) A_s,$$

которая формируется зернами перлита ($n_p A_s$) и феррита ($(1 - n_p) A_s$). С учетом (2) этот участок будет оказывать сопротивление деформированию:

$$\sigma_s = \sigma_p n_p \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right] = \frac{\sigma_c n_p}{\Delta_p} \left[1 - (1 - \Delta_p) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right] \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right]. \quad (3)$$

Если в зоне расположения феррито-перлитного участка в процессе пластической деформации произойдет местный деформационный нагрев стали от температуры T_0 до $T = T_0 + \Delta T$ и такой нагрев будет действовать достаточно для протекания диффузионных процессов время, то появится возможность для изменения величины Δ_p .

Изменение размера Δ_p перлитной частицы вследствие диффузии можно в первом приближении представить выражением

$$\Delta_p = m D^{1/2} m A^{1/2} e^{-Q/2RT}, \quad (4)$$

где m , D , A , Q , R , T – соответственно постоянная, коэффициент диффузии $\left(D = A e^{-\frac{Q}{RT}} \right)$,

константа диффузии, теплота диффузии (высота потенциального барьера, который должен преодолеть атом при переходе из одного положения равновесия в решетке в другое), универсальная газовая постоянная, абсолютная температура в объеме, где протекает диффузия.

Выражение (3) с учетом (4) можно представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_c n_p \frac{e^{\frac{Q}{2RT}}}{m A^{\frac{1}{2}}} \left[1 - \left(1 - m A^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Q}{2RT}} \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right] \times \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right]. \quad (5)$$

Формулу (5) приближенно запишем в виде суммы

$$\sigma_s = \sigma_{\text{атерм}} + \sigma_{\text{терм}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{атерм}}$ — объединяет относительно слабо зависящие от температуры слагаемые (5); $\sigma_{\text{терм}}$ — объединяет остальные слагаемые (5).

Выражения (2)–(5) имеют вполне ясный физический смысл. Сопоставление (5) с ранее полученными другими авторами [9] на основании экспериментальных данных эмпирическими и полуэмпирическими (с привлечением дислокационных механизмов пластичности) формулами для напряжений кривых течения разных материалов показывает, что при этом в неявном виде в формулы закладывалось описание структурных и диффузионных эффектов, проявляющихся при пластическом течении. На это указывает и форма представления полуэмпирических уравнений в виде произведения составляющих, учитывающих вклады интенсивности деформаций, скорости деформаций и температуры, подмеченная в [9]. При этом надо учитывать, что интенсивность и скорость деформаций являются основными факторами, определяющими локальный разогрев материала в очаге предразрушения, а температура напрямую влияет на скорость протекания диффузионных процессов и изменение физико-механических характеристик материала в зоне предразрушения. Установленная в экспериментах автора для низкоуглеродистой стали ВСт3сп при квазистатическом растяжении средняя температура разогрева зоны предразрушения составляет примерно 20–90 °С. В очагах нагрева температура материала увеличивается до значительно более высоких величин (вплоть до температуры плавления) [3, 5]. Влияние разогрева на процессы деформирования и зарождения разрушения надо разделить на две стадии. На первой стадии пластического течения и подъема температуры вследствие физико-химических изменений в этой зоне протекают в основном диффузионные процессы, развивается пластичность по дислокационно-диффузионным механизмам, нарушается сплошность материала и образуются микродефекты. Это происходит в зоне максимальных температур, у надрезов. Образовавшиеся на первой стадии свободные поверхности (полости, трещины) медленно подрастают на второй стадии. Несложно допустить, что на этой стадии к де-

формациям растяжения (ε_e) от внешних сил добавляются тепловые деформации того же знака (ε_t). Под действием суммарной термомеханической деформации ($\varepsilon_e + \varepsilon_t$) происходят формирование начальной трещины и ее рост до критической величины.

Об учете поверхностной энергии при выводе формулы Давиденкова – Спиридоновой. Н. Н. Давиденков и Н. И. Спиридонова в [10] получили выражение для коэффициента $K_{\text{ш}}$, выражающего локальное повышение напряжений при образовании шейки в цилиндрическом образце (рис. 2) в виде

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{a}{4R}. \quad (7)$$

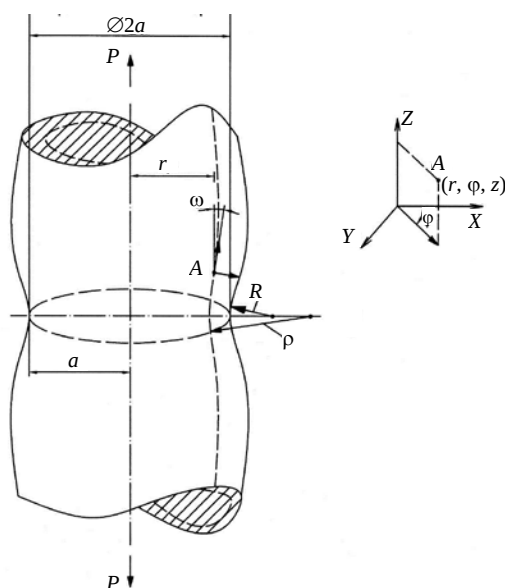


Рис. 2. Профиль шейки

Следует заметить, что коэффициент получен с использованием экспериментальных данных, позволивших авторам [10] обосновать три предположения, положенных в основу вывода.

1. «Деформация зерен в радиальном и тангенциальном направлениях практически одинакова, а следовательно... равны и соответствующие напряжения».

2. «Деформация не изменяется также и при переходе от зоны к зоне, т. е. одинакова по всему сечению образца (для данного этапа развития шейки), а следовательно, одинаковы и эффективные напряжения (этим именем мы назы-

ваем разность главных напряжений, которая оказывается виновницей пластической деформации по гипотезам как максимальных, так и октаэдрических касательных напряжений)».

3. «Рассматривая образующую поверхность шейки как траекторию главных напряжений на контуре, заметим, что кривизна этих траекторий должна постепенно уменьшаться, достигая нуля на оси образца».

Далее авторы [10] посредством рассуждений и экспериментальной проверки приходят к выводу, что «кривизна пропорциональна x и может быть представлена формулой»

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{aR},$$

где a – радиус сечения шейки; ρ – радиус кривизны в сечении, нормальном к оси стержня; R – радиус кривизны ее контура в меридиальном сечении; $x = r$ – расстояние от оси образца до текущего внутреннего криволинейного слоя (a, ρ, R показаны на рис. 2).

Заметим, что авторы [10] для обоснования введенных предположений использовали экспериментальные данные, полученные на круглых образцах диаметрами 25,0–25,1 мм. Учитывая допущения [10], вырежем на расстоянии x от оси образца (рис. 2) элемент поверхности (рис. 3) и, рассмотрев равенство нулю суммы проекций всех сил на ось « $m-t$ », получим формулу Лапласа (8):

$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} - \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{p}{h}, \quad (8)$$

где $\frac{d\alpha_m}{ds_2} = \frac{1}{\rho_m}$; $\frac{d\alpha_t}{ds_1} = \frac{1}{\rho_t}$ – кривизна поверхности в меридиональном и тангенциальном направлениях; σ_m, σ_t – напряжение в меридиональном и тангенциальном направлениях; p – внешняя распределенная нагрузка.

Пусть $h \rightarrow 0$. Тогда вместо h и p получим dx и dp , а вместо σ_t и σ_m имеем соответствующие поверхностные натяжения P_t и P_m . Формула примет вид для поверхностных натяжений

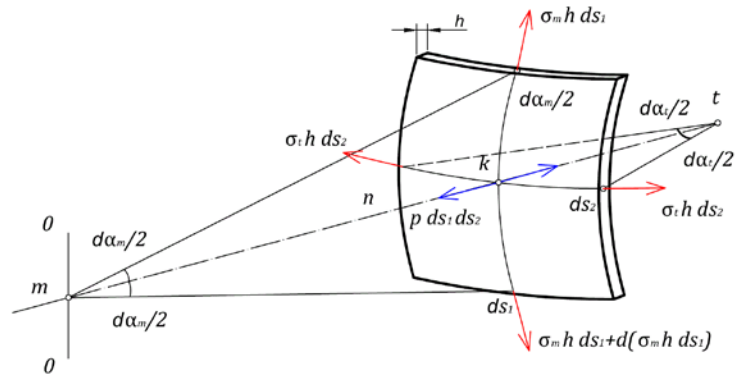


Рис. 3. К выводу формулы Лапласа

$$\frac{P_t ds_2}{\rho_t} - \frac{P_m dS_1}{\rho_m} = \frac{dp}{dx}. \quad (9)$$

Преобразуем (9) с учетом теоремы о среднем

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= \frac{P_t ds_2}{\rho_t} - \frac{P_m dS_1}{\rho_m} = \frac{P_t ds_2 \rho_m - P_t ds_2 \rho_m}{\rho_t \rho_m} = \\ &= \frac{(P_t - P_m)}{\rho_t \rho_m} dSx. \end{aligned} \quad (10)$$

Примем, $P_m - P_t = P_0$ и введем обозначения $a = \rho_t$, $R = \rho_m$. Тогда можно определить радиальные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_r = \sigma_t &= \int_x^a \frac{P_m - P_t}{2aR} dSx = \\ &= P_0 \int_x^a \frac{x dx}{2aR} = \frac{\sigma_0 (a^2 - x^2)}{2aR}. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда

$$\sigma_m = \sigma_r + \sigma_0 = \sigma_0 \left(1 + \frac{a^2 - x^2}{2aR} \right).$$

Растягивающее стержень усилие получаем интегрированием

$$\begin{aligned} F &= \int_0^a \sigma_0 \left(1 + \frac{a^2 - x^2}{2aR} \right) 2\pi x dx = \\ &= \pi a^2 \sigma_0 \left(1 + \frac{a}{4R} \right) = \bar{\sigma} \pi a^2, \end{aligned}$$

откуда

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} = 1 + \frac{a}{4R} = K_{ш}. \quad (12)$$

При образовании шейки происходит резкое повышение температуры в ослабленном сечении [11, 12]. Можно допускать, что ответственным за такое повышение является слагаемое σ_0 в (12), зависимость которого от температуры изменяется по выражению (7).

ВЫВОДЫ

1. Сопротивление деформированию конструкционной стали в зоне местного деформационного нагрева зависит как от величины такого нагрева, так и от времени его протекания.

2. Формула Давиденкова – Спиридоновой, определяющая сопротивление деформированию растянутого круглого стального стержня в стадии образования шейки, впервые выведена с использованием понятия «поверхностная энергия» и формулы Лапласа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т. 2: Физико-химическая теория пластичности. – 416 с.
2. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов / К. Б. Абрамова [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, вып. 5. – С. 842–843.
3. Хайнике, Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
4. Будадин, О. Н. Тепловой контроль / О. Н. Будадин, В. П. Вавилов, Е. В. Абрамова. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 171 с.
5. Клявин, О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах / О. В. Клявин. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
6. Thomson, W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter / W. Thomson // Quart. J. of Math. – 1857. – No 1. – P. 57–77.
7. Horvath, L. Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau Typischen Bauteile mit Thermovision: Dissertation zu Erlangung des Akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs / L. Horvath. – Cottbus: BTU, 2002. – 84 p.
8. Мойсейчик, Е. А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом / Е. А. Мойсейчик // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – № 1. – С. 134–142.
9. Залого, В. А. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов / В. А. Залого, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // Вісник СумДУ. – 2006. – № 12 (96). – С. 101–115.
10. Давиденков, Н. Н. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков,

Н. И. Спиридонова // Заводская лаборатория. – 1945. – № 6. – С. 583–593.

11. Testing the Tensile Features of Steel Specimens by Thermography and Conventional Methods / M. Kutin [et al.] // Scientific Technical Review. – 2010. – Vol. 60, No 1. – P. 66–70.

12. Лукин, Е. С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Е. С. Лукин. – Якутск, 2005. – 23 с.

REFERENCES

1. Gubkin, S. I. (1961) *Metal Plastic Deformation. Vol. 2: Physico-Chemical Theory of Plasticity*. Moscow, Metallurgizdat. 416 p. (in Russian).
2. Abramova, K. B., Shherbakov, I. P., Rusakov, A. I., & Semenov, A. A. (1999) Emission Processes, Accompanying Metal Deformation and Destruction. *Fizika Tverdogo Tela [Solid-State Physics]*, 41 (5), 842–843 (in Russian).
3. Hainike, G. (1987) *Tribochemistry*. Moscow, Mir. 584 p. (in Russian).
4. Budadin, O. N., Vavilov, V. P., & Abramova, E. V. (2011) *Heat Control*. Moscow, Spektr. 171 p. (in Russian).
5. Kliavin, O. V. (1987) *Physics of Crystal Plasticity at Helium Temperatures*. Moscow, Nauka. 256 p. (in Russian).
6. Thomson, W. (1857) On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter. *Quart. J. of Math.*, 1, 57–77.
7. Horvath, L. (2002) *Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau Typischen Bauteile mit Thermovision. Dissertation zu Erlangung des Akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs* [Experimental Investigations of the Typical Components in Steel Construction with Thermal Vision. Dissertation Doctor Engineer]. Cottbus. 84 p. (German).
8. Moyseychik, E. A. (2013) Investigations on Heat Generation and Fracture Initiation in Steel Expanded Plate with Design and Technological Defect. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]*, 1, 134–142 (in Russian).
9. Zaloga, V. A., Krivoruchko, D. V., & Khvostik, S. N. (2006) On Selection of Equation for State of Material to be Machined in Order to Simulate Cutting Process While Using Finite Elements Method. *Visnik SumDU [Bulletin of Sumy State University]*, 12 (96), 101–115 (in Russian).
10. Davidenkov, N. N., & Spiridonova, N. I. (1945) Analysis of Stress State in Expanded Specimen Neck. *Zavodskaya Laboratoria [Plant Laboratory]*, 6, 583–593 (in Russian).
11. Kutin, M., Ristić, S., Burzić, Z., & Puharić, M. (2010) Testing the Tensile Features of Steel Specimens by Thermography and Conventional Methods. *Scientific Technical Review*, 60 (1), 66–70.
12. Lukin, E. S. (2005) *Investigations on Limit State of Structural Steel According to Thermoplastic Effect. Author's Abstract of PhD Thesis Research*. Yakutsk, Institute of Physico-Engineering Problems of the North of the Siberian Division of RAS. 23 p. (in Russian).

Поступила 16.01.2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ*

*Докт. физ.-мат. наук, проф. НУРМИНСКИЙ Е. А.¹⁾,
докт. техн. наук, проф. ПУГАЧЕВ И. Н.²⁾, канд. физ.-мат. наук ШАМРАЙ Н. Б.³⁾,
канд. техн. наук, доц. СЕДЮКЕВИЧ В. Н.⁴⁾*

¹⁾Дальневосточный федеральный университет (Россия),

²⁾Тихоокеанский государственный университет (Россия),

³⁾Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,

⁴⁾Белорусский национальный технический университет

E-mail: nurminskiy.ea@dvfu.ru

Рассмотрена транспортная система одного из слабо освоенных регионов Восточной Сибири, для которого планируются инвестиции в развитие соответствующей инфраструктуры. Эффективное использование инвестируемых средств предполагает изучение имеющегося спроса на транспортные услуги в области пассажирских перевозок, результаты которого могут быть использованы в планировании развития дорожной сети и системы автобусного сообщения.

В связи с отсутствием прямых данных об имеющемся спросе предпринята попытка его модельного описания с помощью модифицированных гравитационных моделей для определения объемов перемещения населения с использованием маршрутных автобусов и индивидуальных автомобилей между населенными пунктами. Всего в модели рассмотрено более 5000 корреспондирующих пар населенных пунктов для 86 населенных пунктов, где проживало свыше 80 % всего населения региона, из которых выделена потокообразующая часть в объеме 60 %. Перевозки в корреспондирующих парах определяли на основе гравитационных моделей с различными функциями притяжения и методом Эрроусмита для удовлетворения транспортных балансов. Наиболее адекватные результаты получены с помощью экспоненциальной функции притяжения для индивидуальных автомобилей и степенной – для маршрутизируемого пассажирского автотранспорта, что вполне согласуется с предпочтением маршрутизируемого автотранспорта для дальних перевозок. Древовидная структура имеющейся дорожной сети позволила избежать рассмотрения альтернативных маршрутов при перемещении пассажиров и непосредственно рассчитать транспортные потоки на определенных участках. Сравнение полученных на этой основе транспортных потоков с имеющимися частичными данными наблюдений демонстрирует удовлетворительное совпадение на основном массиве эмпирических данных. Результаты расчетов показывают эффективность подобного подхода, а сами данные могут служить ориентиром для транспортного планирования.

Ключевые слова: транспортный спрос, прогноз пассажиропотоков, расчет корреспонденций, моделирование автомобильных перемещений.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 15 назв.

DETERMINATION OF PASSENGER-TRAFFIC FLOWS IN REGIONAL TRANSPORT SYSTEM ON THE BASIS OF MODIFIED GRAVITY MODELS

*NURMINSKIY E. A.¹⁾, PUGACHEV I. N.²⁾,
SHAMRAY N. B.³⁾, SEDYUKEVICH V. N.⁴⁾*

¹⁾Far Eastern Federal University, Russian Federation (Russia),

²⁾Pacific National University, Russian Federation (Russia),

³⁾Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Russian Federation,

⁴⁾Belarusian National Technical University

The paper considers a transportation system of one poorly developed region of the Eastern Siberia where it is planned to make investments for improvement of the corresponding infrastructure. The efficient investment disbursement presupposes study of the existing demand for transport services in the field of passenger traffic. Results of the observations can be used for development planning of a road network and a bus service system.

Due to lack of direct data on the existing demand efforts have been made to obtain its model description while using modified gravity models that make it possible to estimate volumes of population transportation which is carried out between residential areas by public transport buses and private vehicles. The given models have permitted to make analysis of more than

* Работа частично поддержана грантом РФФИ 13-07-12010.

5000 populated locality pairs for 86 residential areas where the population constitutes more than 80 % and its passenger flow formation component is equal to 60%. Traffic flows between these settlement pairs have been estimated with the help of gravity models with various attraction functions and Arrowsmith method for provision of transportation balances. The most adequate results have been obtained while using an exponential attraction function for individual vehicles and a power attraction function for passenger route auto transport. Such approach is consistent with the preference of the route auto transport in case of long-distance transport service. A tree-like structure of the existing traffic system has given the possibility to avoid consideration of alternative routes in case of passenger transportation and directly calculate transport flows for certain road sections. Comparative analysis of the transport flows using the proposed methodology and the existing partial data of the executed observations reveals satisfactory coincidence of empirical data for the main part of the traffic system. The obtained results demonstrate an efficiency of the described approach and the presented data can be used as a benchmarking tool for transport planning.

Keywords: transportation demand, passenger flow forecasting, correspondence estimation, vehicle route modeling.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 15 titles.

Введение. Программами развития Сибирского и Дальневосточного федеральных округов предполагаются значительные инвестиции в расширение транспортной инфраструктуры региона. Для эффективного использования инвестиций уже на этапе разработки таких проектов необходимо применять средства оценки их влияния на социально-экономическую жизнь региона, т. е. определить, какое влияние эти проекты окажут на объемы и качество транспортных услуг. Одно из таких средств – исследование транспортных систем с помощью математических моделей и методов. Последние позволяют получать объективные оценки функционирования транспортной системы, выбирать наиболее эффективные проекты и предотвращать затратные мероприятия, которые могут на самом деле привести к ухудшению транспортной ситуации. Ключевой момент подобных исследований – прогноз спроса на транспортные услуги в пределах региона, что дает возможность спрогнозировать загрузку транспортной сети, системные и пользовательские затраты.

Исследование транспортных систем с помощью математических моделей и методов сегодня также актуально в связи с развитием в России навигационно-коммуникационных технологий, которые позволяют реализовать новые принципы управления транспортом и потоками, приводят к существенному увеличению эффективности логистики и эксплуатации машин и механизмов. Создание и развитие интеллектуальных систем управления в регионах даст возможность качественно изменить процессы организации и управления, наладить бесперебойную и безопасную работу транспор-

та, обеспечить лучшие условия для инфраструктурного развития. Для Сибири и Дальнего Востока особенно важно использование современных сервисов на удаленных территориях, создающих условия для доступной логистики и повышающих качество жизни в регионе [1]. Такие технологии открывают новые возможности для прогноза транспортного спроса, однако чтобы полностью реализовать их потенциал, необходимо уже сейчас разрабатывать математические модели спроса и оценивать их пригодность для тех или иных видов перемещений.

Оценке транспортного спроса в мировой литературе посвящено немало работ. Так, с основными подходами можно ознакомиться в [2], где описан опыт определения объемов перемещения населения между населенными пунктами Иркутской области по автодорожной сети и приведено сравнение рассчитанных на этой основе нагрузок на транспортную инфраструктуру с имеющимися частичными данными. Оценка транспортного спроса представляла собой часть выполнения государственного контракта 13-ОК/12 (от 12.09.2012) на научно-исследовательскую работу по составлению транспортной модели Иркутской области.

Математическое моделирование транспортного спроса. Ключевая информация в транспортном планировании – это объемы спроса на перевозки. Под транспортным спросом будем понимать объемы пассажиропотоков между различными населенными пунктами Иркутской области, где один из пунктов считается начальным, а второй – конечным. Формальным представлением этих данных является матрица корреспонденций, строкам которой соответствуют

зоны отправления, а столбцам – зоны прибытия. Обозначим через T_{ij} транспортный спрос между пунктами i и j (корреспонденция между i и j); очевидно, что все $T_{ij} \geq 0$. Если удастся объективно оценить объемы отправления O_i из пункта i и объемы выезда D_j из пункта j , то для элементов T_{ij} матрицы корреспонденций обычно требуется выполнение балансов:

$$\sum_j T_{ij} = O_i, \quad i = 1, 2, \dots;$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j, \quad j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Подходы к моделированию корреспонденций условно можно разделить на методы, использующие факторы роста (методы аналогий), и методы, учитывающие межзональные факторы (синтетические методы). Методы аналогий основаны фактически на предположении о неизменности структуры потокообразующих процессов, что не подходит к оценке влияния крупных транспортных проектов, сопровождающих значительные изменения социально-экономической ситуации в регионе. Для прогнозов транспортного спроса в таких ситуациях более подходят синтетические методы, в основе которых лежит предположение о том, что распределение корреспонденций может быть определено по базовым предположениям о природе передвижений и учету пространственных факторов. Одним из таких методов, широко используемых в мировой практике транспортных исследований, является расчет корреспонденций на основе модифицированной гравитационной модели [3–9], которая описывает корреспонденции с помощью уравнений вида

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij}),$$

где c_{ij} – затраты (временные, финансовые) на передвижение между пунктами i и j ; $f(c_{ij})$ – функция тяготения, характеризующая предпочтения индивидуумов при выборе передвижения из i в j ; A_i , B_j – калибровочные коэффициенты, которые подбираются так, чтобы удовлетворить балансы (1):

$$A_i = [\sum_{j=1}^n B_j f(c_{ij})]^{-1}; \quad B_j = [\sum_{i=1}^m A_i f(c_{ij})]^{-1}.$$

Подбор этих коэффициентов производится при помощи специальных процедур, называемых

методами балансировки [10–13]. В настоящем исследовании для численного расчета корреспонденций использовали метод [11], который показал вполне удовлетворительные результаты.

Статистика и транспортная характеристика региона. Иркутская область расположена в юго-восточной части Сибирского федерального округа. По площади территории (774,8 тыс. кв. км; 4,53 % территории России) область занимает 5-е место среди регионов России. По данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области, оценка численности постоянного населения Иркутской области с учетом окончательных итогов всероссийской переписи населения на 1 января 2012 г. составила 2424,4 тыс. чел., по плотности населения область занимает 69-е место в России. В состав области входят 33 муниципальных района, девять городских округов, 67 городских и 365 сельских поселений.

Как и все территории Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, Иркутская область относится к слабоосвоенным территориям с уровнем обеспеченности автомобильными дорогами 42 % от расчетного показателя. Вместе с тем, промышленно-энергетический потенциал и стратегически выгодное географическое положение делают ее одним из важнейших регионов и серьезным кандидатом на реализацию программ развития и соответствующих проектов по совершенствованию транспортной инфраструктуры.

Для оценки транспортного спроса были выбраны 86 основных населенных пунктов области с суммарным количеством жителей 1976484, или 81,5 % от их общего числа. Экономически активное население, которое участвует в генерации транспортного спроса Иркутской области, составляет 61 %. Для калибровки модели использовали следующие данные: численность населения административных районов области, численность населения и годовой доход местного бюджета населенных пунктов, общее количество отправок со станций области по Транссибирской железной дороге, годовой оборот пассажиров на пригородном и междугородном автобусных

сообщениях, годовой оборот пассажиров на внутренних авиалиниях. Транспортный спрос в Иркутской области описывали четырьмя матрицами корреспонденций: перемещения на частных легковых автомобилях, маршрутных автобусах, железнодорожным транспортом, авиасообщением. Весь спрос на пассажироперевозки делили между указанными видами перемещений в пропорциях 19:65:15:1, что соответствовало имеющейся статистике продаж билетов и уровню автомобилизации области.

При расчете корреспонденций Иркутской области использовали два вида функций тяготения $f(c_{ij})$: $\lambda_{ij}e^{-\gamma c_{ij}^{\theta}}$ – для легковых автомобилей и $\lambda_{ij}c_{ij}^{-\theta}$ – для автобусов, где c_{ij} – среднее время (для автомобилей) или средние затраты (для остальных видов транспорта) на передвижение из i в j ; γ , θ – калибровочные коэффициенты; λ_{ij} – коэффициент «привлекательности» поездки из i в j . Самые полные и представительные результаты были получены на наиболее массовом виде перемещений, осуществляемых индивидуальными легковыми автомобилями, что и представлено в данной статье.

Выбор значений коэффициентов «привлекательности» λ_{ij} осуществляли на основе некоторых соображений о предпочтениях одних населенных пунктов другим. Такие предпочтения определяются не только удаленностью пунктов друг от друга, но и их административной значимостью и подчиненностью, показателями их экономической деятельности, туристической привлекательностью. В исследовании при моделировании передвижений населения коэффициенты λ_{ij} рассчитывали по следующей формуле:

$$\lambda_{ij} = k_{ij} \tau_j E_i^{\alpha_i} E_j^{\alpha_j},$$

где k_{ij} – коэффициент связности i -го и j -го населенных пунктов, определяемый в зависимости от их административной значимости и подчиненности; τ_j – туристическая привлекательность пункта j ; E_i – доход на душу населения в пункте i ; α_i , α_j – калибровочные коэффициенты.

Значения коэффициентов связности k_{ij} определяются по табл. 1 и зависят от административной значимости пунктов i и j (го-

род, поселок городского типа, поселок, село) и их принадлежности одному или разным районам.

Таблица 1

Значения коэффициентов связности

Административная значимость первого населенного пункта	Территориальная принадлежность населенного пункта	Коэффициент k_{ij} в зависимости от административной значимости второго населенного пункта			
		Город	Поселок городского типа	Поселок	Село
Город	Один район	1,0	1,0	0,7	0,4
	Разные районы	0,4	0,3	0,1	0,1
Поселок городского типа	Один район	1,0	0,7	0,3	0,2
	Разные районы	0,3	0,3	0,1	0,1
Поселок	Один район	0,7	0,5	0,2	0,2
	Разные районы	0,1	0,1	0,1	0,1
Село	Один район	0,5	0,2	0,2	0,2
	Разные районы	0,1	0,1	0,1	0,1

Ключевой входной информацией при расчете корреспонденций по гравитационной модели (1) являются объемы отправок O_i и прибытий D_j . По имеющейся статистике только для железнодорожной сети можно было воспользоваться эмпирическими данными отправок. Однако поскольку наблюдалась хорошая корреляция (0,89) между объемами отправок с железнодорожных станций и населением соответствующих им пунктов, для автодорожной сети объемы отправок рассчитывали как определенный процент от общего населения (10 % городского населения; 20 % населения поселков городского типа; 30 % населения поселков; 40 % населения сел). При этом полагалось, что $O_i = D_i$ для всех рассматриваемых пунктов i .

Моделирование автомобильных корреспонденций. При моделировании автомобильных перемещений посредством личного легкового и общественного транспорта использовали графовую модель автодорожной сети Иркутской области (рис. 1), отображающую реальную географическую информацию о расположении населенных пунктов.



Рис. 1. Графовая модель автодорожной сети Иркутской области. Различные типы линий соответствуют разным типам дорог, для которых установлены соответствующие лимиты допустимых скоростей передвижения

Поскольку не все из рассматриваемых 86 пунктов связаны основной автотранспортной сетью, число корреспондирующих пар составило 5550. Для определения временных затрат c_{ij} при передвижении на частных легковых автомобилях рассчитывали кратчайшие пути между вершинами графа. При этом вес каждого ребра определяли как ρ_a/v_a , где ρ_a – фактическая длина (км) соответствующего ребра участка дороги; v_a – средняя скорость по участку дороги, значение которой зависит от типа покрытия дороги: $v_a = 90$ км/ч – для дорог с асфальтовым покрытием; $v_a = 80$ км/ч – с комбинированным покрытием; $v_a = 60$ км/ч – отсыпанных гравием; $v_a = 40$ км/ч – без покрытия; $v_a = 20$ км/ч – для паромных переправ. Для ребер, где предполагается паромная переправа, время проезда было увеличено на 1 ч, чтобы учесть значительный пример ожидания.

Для определения стоимости проезда c_{ij} при передвижении на маршрутных автобусах рассчитывали кратчайшие сетевые расстояния между пунктами; тариф за проезд был принят 1 руб./км. При расстоянии менее 15 км стоимость проезда принимали равной 15 руб. [14, 15].

Анализ полученных результатов. Вычислительные эксперименты по расчету корреспонденций между 5550 парами населенных пунктов Иркутской области показали высокую сходимость метода балансировки из [11] к искомой матрице корреспонденций – сбалансированная матрица была получена всего за 15 итераций. График сходимости метода приведен на рис. 2.

По отдельным ребрам сети имелась информация об интенсивности автомобильного движения, что позволяло провести косвенную оценку адекватности синтетического подхода для описания транспортного спроса в Иркутской области.

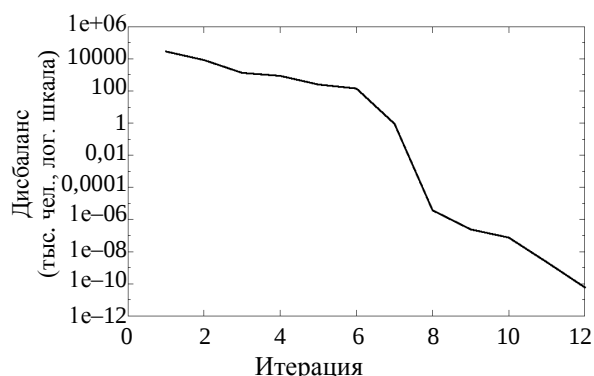


Рис. 2. График сходимости метода балансировки

Результаты вычисления автомобильных потоков по определенным участкам дорог, где имелись соответствующие данные, приведены на рис. 3.

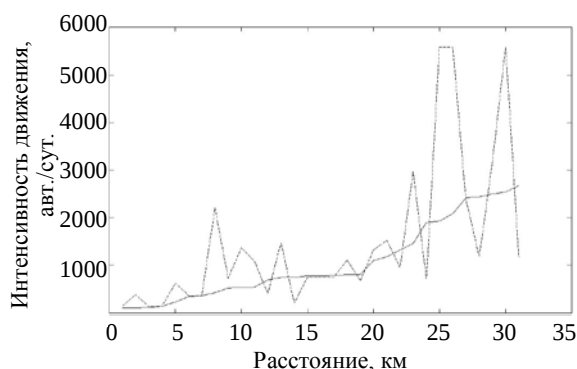


Рис. 3. Расчетные (сплошная линия) и эмпирические (пунктирная) значения потоков на участках автодорожной сети

Сравнение показывает достаточно хорошее совпадение прогноза с реальностью на всех 32 пунктах учета, за исключением небольшого количества дорог, представленных в табл. 2, на которых была отмечена аномально большая интенсивность движения.

Таблица 2

Расчетные и эмпирические значения потоков на участках автодорожной сети с большими отклонениями

Населенный пункт		Интенсивность движения, авт./сут.	
Начальный	Конечный	Прогноз	Наблюдение
28 км	Большая Речка	2541	5580
Большая Речка	Листвянка	2089	5580
Усть-Ордынский	Оса	427	2200
Зима	Саянск	1931	5589

Причинами этого могли быть особые условия движения, скажем, большой грузовой поток, включенный в общие данные, наличие по этому направлению большого числа дачных участков, которые не учитывались в модели, или какие-либо иные особенности учета. Возможно, что после уточнения всех обстоятельств степень совпадения прогноза и реальных данных (рис. 4) на этих отдельных сингулярных участках можно будет повысить.

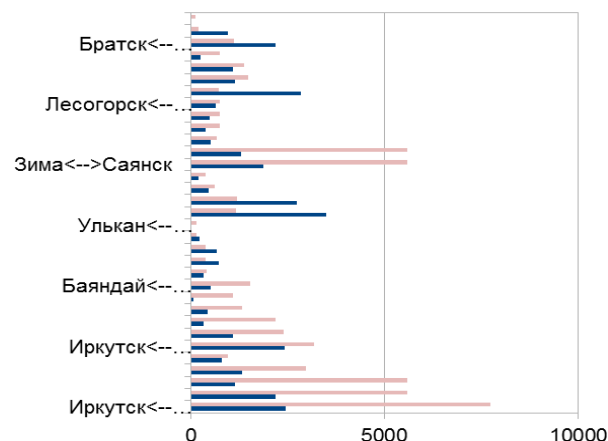


Рис. 4. — наблюдаемые значения; — расчетные значения

ВЫВОД

Проведенные исследования показали, что моделирование транспортного спроса в региональных автодорожных сетях на основе модифицированной гравитационной модели приводит к адекватным результатам, которые вполне можно использовать как объективные характеристики транспортной сети при создании проектов ее развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пугачёв, И. Н. Использование навигационных спутниковых систем в управлении автомобильными перевозками / И. Н. Пугачёв, Ю. И. Куликов, Г. Я. Маркелов // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2011. – № 4. – С. 64–69.
2. Ortuzar, J. D. Modeling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. – Wiley, 2011. – 4th ed. – P. 606.
3. Voorhees, A. M. A General Theory of Traffic Movement / A. M. Voorhees // Transportation. – 2013. – Vol. 40, № 6. – P. 1105–1116.
4. Carrothers, G. A. An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction / G. A. Carrothers.

thers // Journal of the American Institute of Planners. – 1956. – Vol. 22. – P. 94–102.

5. **Voorhees, A. M.** Forecasting Peak Hours of Travel / A. M. Voorhees // Highway Research Board Bulletin. – 1958. – Vol. 203. – 37–46.

6. **Wilson, A. G.** A Statistical Theory of Spatial Distribution Models / A. G. Wilson // Transportation Research. – 1967. – Vol. 1. – P. 253–269.

7. **Wilson, A. G.** A Family of Spatial Interaction Models and Associated Developments / A. G. Wilson // Environment and Planning A. – 1971. – Vol. 3 (1). – P. 1–32.

8. **Лившиц, В. В.** Математическая модель случайно-детерминированного выбора и ее применение для расчета трудовых корреспонденций / В. В. Лившиц // Автоматизация процессов градостроительного проектирования. – М.: ЦНИИП градостроительства, 1973. – С. 39–57.

9. **Системный анализ и проблемы развития городов** / Ю. С. Попков [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 512 с.

10. **Furness, K. P.** Time Function Iteration / K. P. Furness // Traffic Engineering & Control. – 1965. – No 7. – P. 458–460.

11. **Arrowsmith, G. A.** A Behavioural Approach to Obtaining a Doubly Constrained Trip Distribution Model / G. A. Arrowsmith // Operational Research Quarterly. – 1973. – Vol. 24, No 1. – P. 183–194.

12. **Lamond, B.** Bregman's Balancing Method / B. Lamond, N. F. Stewart // Transportation Research. – 1981. – Vol. 15 (B). – P. 239–248.

13. **Schneider, M. H.** A Comparative Study of Algorithms for Matrix Balancing / M. H. Schneider, S. A. Zenios // Operations Research. – 1990. – Vol. 38, No 3. – P. 439–455.

14. **Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://irkutskstat.gks.ru>.

15. Транспорт и связь: стат. ежегодник Иркутской области. – Иркутск: Иркутскстат, 2012. – 100 с.

REFERENCES

1. **Pugachiov, I. N.,** Kulikov, Yu. I., Markelov, G. Ya. (2011) Usage of Navigation Satellite Systems in Order to Control Automobile Transportation. *Gruzovoye i Passazhirskoye Avtokhozyastvo* [Freight And Passenger Transport Service], 4, 64–69 (in Russian).

2. **Ortuzar, J. D.,** & Willumsen, L. G. (2011) *Modeling Transport*. 4th ed. Wiley. 606.

3. **Voorhees, A. M.** (2013) A General Theory of Traffic Movement. *Transportation*, 40 (6), 1105–1116. Doi: 10.1007/s11116-013-9487-0.

4. **Carrothers, G. A.** (1956) An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94–102. Doi: 10.1080/01944365608979229.

5. **Voorhees, A. M.** (1958) Forecasting Peak Hours of Travel. *Highway Research Board Bulletin*, 203, 37–46.

6. **Wilson, A. G.** (1967) A Statistical Theory of Spatial Distribution Models. *Transportation Research*, 1, 253–269. Doi: 10.1016/0041-1647(67)90035-4.

7. **Wilson, A. G.** (1971) A Family of Spatial Interaction Models and Associated Developments. *Environment and Planning A*, 3 (1), 1–32. Doi: 10.1068/a030001.

8. **Livshits, V. V.** (1973) Mathematical model for Random Judgement-Based Sampling and its Application for Calculation of Labour Correspondences. *Automation of Urban Planning Processes*. Moscow, Central Scientific-Research and Design Institute for Town Planning, 39–57 (in Russian).

9. **Popkov, Yu. S.,** Posohin, M. V., Gutnov, A. Je., & Shmul'jan, B. L. (1983) *System Analysis and Problems of Urban Development*. Moscow, Nauka. 512 p. (in Russian).

10. **Furness, K. P.** (1965) Time Function Iteration. *Traffic Engineering & Control*, 7, 458–460.

11. **Arrowsmith, G. A.** (1973) A Behavioural Approach to Obtaining a Doubly Constrained Trip Distribution Model. *Operational Research Quarterly*, 24 (1), 183–194.

12. **Lamond, B.,** & Stewart, N. F. (1981) Bregman's Balancing Method. *Transportation Research*, 15 (B), 239–248.

13. **Schneider, M. H.,** & Zenios, S. A. (1990) A Comparative Study of Algorithms for Matrix Balancing. *Operations Research*, 38 (3), 439–455. Doi: 10.1287/opre.38.3.439.

14. **Local Organization of Federal State Statistics Service for the Irkutsk Region.** Available at: <http://irkutskstat.gks.ru>. (accessed 25 January 2015).

15. **Transport and Communication. Annual Abstract of Statistics for the Irkutsk Region.** Irkutsk, Irkutskstat, 2012. 100 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНОСТИ ПО МЕТОДУ КОНФЛИКТНЫХ ЗОН В КОНФЛИКТЕ «ТРАНЗИТНЫЙ ТРАНСПОРТ – ПЕШЕХОД» НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕКРЕСТКЕ

Канд. техн. наук, доц. КАПСКИЙ Д. В.¹⁾, докт. техн. наук, проф. ПЕГИН П. А.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,
²⁾Тихоокеанский государственный университет (Россия)

E-mail: d.kapsky@gmail.com

Аварийность является самой значимой издержкой дорожного движения. Поэтому любые мероприятия по организации дорожного движения должны быть оценены по критерию минимизации аварийных потерь. Для создания способа определения аварийных потерь необходимо разработать методики стоимостной оценки аварий различной тяжести последствий и прогнозирования аварий (экономическая оценка) и тяжести их последствий (количественная оценка опасности). Выполнены исследования, которые позволяют разработать соответствующие модели прогнозирования аварийности еще на стадии принятия решений по организации дорожного движения для конфликта «транспорт – пешеход». Взаимодействие пешеходных и транзитных транспортных потоков характеризуется высокой степенью опасности. Для того чтобы снизить число аварий и тяжесть их последствий в рассматриваемом конфликте, необходимо еще на стадии проектирования объекта и разработки мероприятия оценить предлагаемые решения, т. е. спрогнозировать аварийность.

Приведены исследования специфики взаимодействия транспортных и пешеходных потоков, а также анализ формирования пространственных конфликтных точек и создания конфликтных зон в исследуемом конфликте между транспортными средствами и пешеходами на регулируемых пешеходных переходах, расположенных в зоне перекрестков. Создана методика прогнозирования аварийности по методу конфликтных зон для различных режимов движения на перекрестках. Установлены зависимости приведенной (по тяжести последствий) аварийности от потенциальной опасности конфликтов в различных режимах движения и для разных условий конфликтного взаимодействия.

Ключевые слова: конфликт «транзитный транспорт – пешеход», потенциальная опасность, прогнозирование аварийности, конфликтные зоны.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

ACCIDENT PREDICTION METHODOLOGY USING CONFLICT ZONE METHOD FOR “TRANSIT TRANSPORT – PEDESTRIAN” CONFLICT SITUATION AND MODELS OF TRAFFIC FLOWS AT CONTROLLED INTERSECTION

KAPSKY D. V.¹⁾, PEGIN P. A.²⁾

¹⁾ Belarusian National Technical University,
²⁾ Pacific National University, Russian Federation (Russia)

Accidents are considered as the most significant cost of road traffic. Therefore any measures for road traffic management should be evaluated according to a minimization criterion of accident losses. In order to develop a method for evaluation of the accident losses it is necessary to prepare a methodology for cost estimate of road accidents of various severity with due account of their consequences and prediction (economic assessment) and severity level of their consequences (quantitative risk assessment). The research has been carried with the purpose to devise appropriate models for accident prediction at a decision-making stage while organizing road traffic in respect of the “transport – pedestrian” conflict. An interaction of pedestrian and transit road traffic flows is characterized by rather high risk level. In order to reduce number of road accidents and severity of their consequences in the observed conflict, it is necessary to evaluate proposed solutions, in other words to predict accidents at the stage of object designing and development of measures.

The paper presents its observations on specificity of road traffic and pedestrian flow interactions and analysis of spatial conflict point formation and conflict zone creation in the studied conflict between transport facilities and pedestrians at controlled pedestrian crossings which are located in the area of intersections. Methodology has been developed for accident prediction in accordance with the conflict zone method for various traffic modes at intersections. Dependences of the represented road traffic accidents (according to consequence severity) on potential danger of conflicts have been determined for various traffic modes and various conditions of conflict interaction.

Keywords: “transit transport – pedestrian” conflict, potential danger, accident prediction, conflict zones.

Fig. 3. Tab. 1. Ref.: 10 tiles.

Известно, что самым опасным на перекрестках является конфликт с транспортными потоками прямого (транзитного) направления, что объясняется их высокой скоростью [1, 2]. На долю таких конфликтов приходится около 90 % всех аварий с пешеходами на регулируемых перекрестках. Конфликты «левоповоротный транспорт – пешеход» и «правоповоротный транспорт – пешеход» примерно одинаковы – на их долю выпадает около 5 и 6 % соответственно [1, 3–5]. В конфликтах с транспортом прямого направления почти две трети аварий совершаются с участием пешеходов, еще не дошедших до середины проезжей части. Основная причина такого распределения – дефицит времени на реагирование у водителя, поскольку пешеход оказывается в опасной зоне сразу после выхода на проезжую часть. В качестве сопутствующей причины примерно 20–25 % конфликтов пешеходов с транспортом прямого направления следует отметить недостаточную длительность переходного интервала светофорного регулирования, не обеспечивающую возможность всем пешеходам освободить проезжую часть до начала движения конфликтующего транспортного потока [2, 4, 6, 7]. Поэтому необходимо превентивно разрабатывать мероприятия по снижению аварийности в данном опасном виде конфликта.

Для исследуемого конфликта пространственная конфликтная точка, так же как и в конфликте «поворотный транспорт – пешеход», расположена посередине полосы движения на пешеходном переходе, а ее границы – это полосы и пешеходный переход (рис. 1). Таким образом, на пешеходном переходе число конфликтных точек равно количеству полос движения на входе в перекресток, и если имеется транзитный выход, – на выходе из него. Для каждого перехода аварийность рассчитывается отдельно для входа в перекресток и выхода из него, а результаты суммируются. Исследуемая выборка при разработке моделей прогнозирования аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» на 100 перекрестках составила 277 аварий, из которых в регулируемом режиме совершено 18 аварий с материальным ущербом, 151 авария с ранением и пять аварий со смертельным исходом. При этом в нерегулируемом режиме совершено четыре аварии с материаль-

ным ущербом, 96 с ранением и три с погибшими. Исследуемый конфликт имеет некоторые особенности, связанные со спецификой взаимодействия транзитных транспортных и пешеходных потоков в межфазном и нерегулируемом режимах.

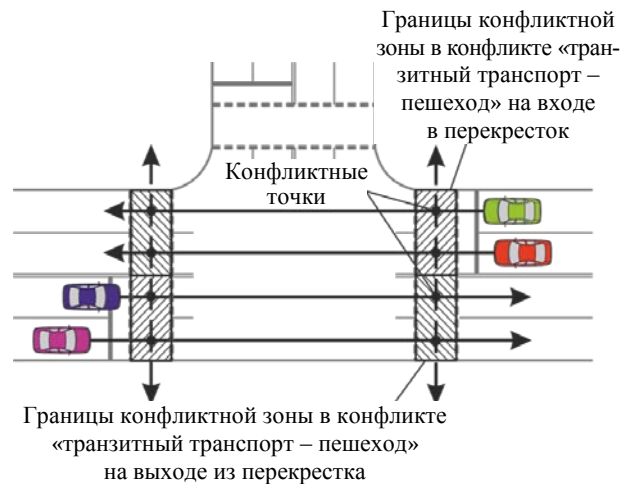


Рис. 1. Конфликтные точки и конфликтная зона

Структурная формула в модели прогнозирования аварийности в регулируемом (межфазном) режиме для расчета потенциальной опасности конфликтной точки имеет следующий вид:

$$P_o = K_{он}^{1,12} K_v^{1,1} K_b^{1,1} K_p^{0,94} K_n^{1,14} K_y^{1,08} K_s, \quad (1)$$

где $K_{он}$ – коэффициент начальной вероятности конфликта, характеризующей вероятность одновременного появления двух конфликтующих участников в конфликтной зоне (ограниченной эллипсом, полуоси которого равны расстоянию, преодолеваемому конфликтующими участниками за 1 с), ед.; K_b – коэффициент вида конфликта, характеризующий габаритные особенности, которые присущи данным конфликтующим участникам; K_v – коэффициент скоростей, характеризующий влияние скоростей движения конфликтующих участников на вероятность возникновения конфликтной ситуации и перерастания ее в коллизию; K_p – коэффициент плотности, характеризующий влияние интенсивности и плотности транспортного потока на вероятность возникновения конфликтной ситуации и перерастания ее в коллизию; K_n – коэффициент нарушений, характеризующий вероятность возникновения конфликтной ситуации и перерастания ее в коллизию при грубых

нарушениях Правил дорожного движения; K_y – коэффициент условий, в которых происходит конфликтное движение; K_t – коэффициент времени, характеризующий продолжительность работы объекта под расчетной транспортно-пешеходной нагрузкой.

Коэффициент начальной вероятности конфликта $K_{он}$ с учетом количества рядов пешеходов определяется по формуле

$$K_{он} = \frac{q_2^* \cdot 2n_{p1}}{t_{пр} \cdot C}, \quad (2)$$

где q_2^* – расчетная интенсивность движения транспортного потока, авт./с; $t_{пр}$ – переходной интервал для транспорта, с; n_{p1} – число рядов пешеходов первого направления в цикле; C – длительность цикла светофорного регулирования, с.

Следует отметить, что рассматриваемые конфликты имеют место и при переходе от транспортной фазы к пешеходной, и при переходе от пешеходной фазы к транспортной. Поэтому потенциальная опасность конфликтной точки для двух переходных режимов суммируется. Коэффициент вида конфликта K_v определяется как произведение K_{v1} и K_{v2} . Коэффициент K_v зависит от габаритов, скорости движения и угла взаимодействия конфликтующих участников, под которыми в конфликте «транспорт – транспорт» понимаются движущиеся транспортные средства, т. е. системы «человек – машина». Этот коэффициент также зависит от возможности конфликтующих участников предпринять уклончивые действия для избежания коллизии, которая зависит от угла взаимодействия (или от взаимной видимости, или вида конфликта). Так, если конфликтующие участники движутся по одной траектории навстречу друг другу, то они прекрасно видят ситуацию и, если есть время, оба могут предпринять уклончивые действия для избежания столкновения. Если же они движутся по одной траектории, но попутно, и первый стоит в очереди, например перед стоп-линией светофора, а второй приближается к нему сзади, то первый участник ничего не может предпринять – он является пассивным, и все зависит только от второго конфликтующего участника, а опасность увеличивается, и коэффициент K_v растет. При этом рассматриваются средние бе-

лорусские водители, поскольку исследовали реальные транспортные потоки в городах нашей страны.

В то же время предприятие уклончивых действий – это физическая возможность системы «человек – машина» избежать столкновения или иной коллизии, а не мастерство конкретного водителя. В модели, чтобы избежать приближенных расчетов, все транспортные средства по своим габаритам и динамическим характеристикам классифицированы на восемь групп, каждая из которых имела свой динамический коэффициент приведения. В расчетах учитывали конкретный состав транспортного потока, который имеет место на конкретном объекте с конкретной траекторией данного конкретного вида конфликта в данном конкретном режиме движения.

Расчеты выполняли по [1], при этом в формулах вместо q_2 брали значение расчетной (на полосе движения) интенсивности движения транзитного транспортного потока q_2^* . При расчете коэффициентов K_v , K_p , K_n , K_b , K_y и K_t использовали скорость движения транзитного транспортного потока v_2 и иные его параметры [1].

Коэффициент боковой видимости K_{y31} определяли по формуле [6]

$$K_{y31} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{3v_p}{S_{61}} + \frac{8}{S_{62}} \right)^2 \geq 1, \quad (3)$$

где v_p – разрешенная скорость движения транспортных средств, м/с; S_{61} – главная (транспортная) сторона в треугольнике боковой видимости в конфликте «транзитный транспорт – пешеход», м ($S_{61} \leq 3v_p$); S_{62} – второстепенная (пешеходная) сторона в треугольнике боковой видимости в конфликте «транзитный транспорт – пешеход», м ($S_{62} \leq 8$ м).

Коэффициент K_{y37} , учитывающий способ реализации переходного интервала для пешеходов ($0,7 \leq K_{y37} \leq 1,0$), выбирается в зависимости от способа реализации и достаточности переходного интервала для пешеходов. Коэффициент времени K_t определяется по формуле

$$K_t = 10^{-3} \Phi_{пр} t_{прт} / C, \quad (4)$$

где $t_{прт}$ – переходной интервал для транспортного потока, с; $\Phi_{пр}$ – годовой фонд времени ра-

боты регулируемого перекрестка под расчетной нагрузкой в этом режиме.

Далее определяли потенциальную опасность конфликтной зоны. Аварийность зависит не только от числа и типа конфликтных точек, но и от расстояния между ними, при этом можно говорить о наличии на каждом конфликтном объекте опасных зон. Г. Раппопорт [8] утверждает, что при «тесном» расположении конфликтных точек, т. е. ближе 15 м друг от друга, в случае, если между ними нет разделительной полосы, опасность в два раза меньше, чем при ином, «рассредоточенном», их расположении. При «тесном» расположении конфликтные точки образуют некую опасную зону, при проезде которой водитель более собран и внимателен. Таким образом, при компактном расположении конфликтных точек они каким-то образом взаимодействуют между собой. Характер взаимодействия конфликтных точек до конца не ясен, но можно предположить, что он лежит в области психофизиологии человека (водителя, пешехода). Поэтому расположение конфликтных точек на объекте является значимым фактором и учитывается в модели прогнозирования аварийности путем формирования конфликтных зон. Конфликтная зона – это неразрывная группа компактно расположенных и взаимодействующих между собой пространственных конфликтных точек, границы которых соприкасаются или пересекаются.

Определение конфликтных зон можно проводить по специальной программе [9, 10] либо графически на масштабном плане объекта, где нанесены траектории движения всех конфликтующих потоков и в местах их пересечения (слияния, отклонения) показано расположение геометрических конфликтных точек. Затем для каждой геометрической конфликтной точки наносят границы пространственных конфликтных точек (рис. 1).

Необходимо отметить, что в конфликтной зоне второстепенный конфликтующий участник преодолевает несколько последовательно расположенных конфликтных точек, из которых одна, самая «тяжелая» (опасная) – для него «главная». Опасность в этой «главной» конфликтной точке является именно той опасностью, на которую участник психологически настраивается и по которой он соизмеряет свои

действия. Поэтому более «легкие» конфликтные точки, встречающиеся до или после «главной» конфликтной точки, преодолеваются им значительно легче, с запасом. В результате значимость (весомость) «легких» конфликтных точек в пределах конфликтной зоны несколько снижается, а «тяжелых» (из-за возможной недооценки опасности), наоборот, возрастает. Если же водитель преодолевает несколько совершенно независимых конфликтных точек, не входящих в конфликтную зону, то в каждой из них он должен оценивать наибольшую опасность и принимать соответствующие решения. Это обстоятельство отображается при суммировании потенциальной опасности конфликтных точек в пределах конфликтной зоны.

По аналогии с конфликтными точками принято считать, что конфликтные зоны взаимодействуют между собой. Взаимозависимость внутри конфликтной зоны связана с оценкой конфликтующим участником (водителем или пешеходом) наибольшей опасности и его настроенностью на ее преодоление. Но после прохождения конфликтной зоны эта настроенность исчезает не мгновенно, а постепенно, в течение 1,0–1,5 с, что вполне согласуется с упоминаемым Г. Раппопортом [8] расстоянием 15 м между конфликтными точками. Поэтому в модели определения потенциальной опасности объекта несколько уменьшается значимость «небольших» конфликтных зон, расположенных на траектории движения второстепенных транспортных потоков, проходящих через «главные», «тяжелые» конфликтные зоны. В связи с этим потенциальная опасность второстепенных («небольших») конфликтных зон в случае, если они связаны между собой общими траекториями движения второстепенных транспортных потоков, уменьшается. В результате учитывается не номинальная P_{oz} , а так называемая расчетная опасность P_{oz}^* второстепенных конфликтных зон. Таким образом, потенциальная опасность конфликтной зоны определяется по формуле

$$P_{oz} = \left[\sum_{k=1}^K (P_o - P_{o0})_k^{0,75} \right]^{0,9}, \quad (5)$$

где P_{o0} – порог чувствительности для регулируемого режима ($P_{o0} = 0,82$ ед.).

Следует пояснить понятие «порог чувствительности». Известно, что некоторые конфликтные объекты работают безаварийно в течение длительного времени. Детальный очаговый анализ аварийности на объектах показал, что в значительной части конфликтных точек аварии также отсутствуют. Это говорит о том, что потенциальная опасность, не превышающая некоторого критического (порогового) значения, не вызывает очаговой аварийности. Порог чувствительности – это минимальная величина потенциальной опасности в конфликтной точке, которая с доверительной вероятностью 0,5 не вызывает аварий в количестве 0,333 ав./год и более. Физический смысл этого явления заключается в том, что система ВАДС (водитель – автомобиль – дорога – среда движения) способна самостоятельно разрешать конфликты малой опасности. При этом постоянное совершенствование конструкции автомобилей в области активной и пассивной безопасности, рост профессионального уровня водителей, подготовка пешеходов к участию в дорожном движении и другие факторы привели к тому, что минимальный уровень опасности, который разрешается автоматически в системе ВАДС, или так называемый порог чувствительности потенциальной опасности со временем постепенно повышается. В разработанных моделях потенциальная опасность конфликтных точек, которая меньше порога чувствительности, не суммируется при определении потенциальной опасности конфликтных зон. В процессе исследований установлены значения порога чувствительности для всех видов конфликта.

Определим вероятное число аварий:

- приведенных

$$P'_a = 0,014P_{oz}^2 - 0,058P_{oz} - 0,004; \quad (6)$$

- не приведенных

$$P_a = \frac{P'_a}{K_{пао}^\Sigma} = 0,229P'_a, \quad (7)$$

где $K_{пао}^\Sigma$ – суммарный динамический коэффициент приведения аварий в нерегулируемом режиме конфликта «транзитный транспорт – пешеход» (табл. 1).

С учетом табл. 1 вероятное число аварий со смертельным исходом

$$P_a^c = 0,0282P_a. \quad (8)$$

Вероятное число аварий

$$P_a^p = 0,7746P_a. \quad (9)$$

Вероятное число аварий с материальным ущербом (неотчетных)

$$P_a^m = 0,1972P_a. \quad (10)$$

Таблица 1

Доля аварий δ_a и динамические коэффициенты приведения $K_{пао}$ в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» на регулируемых перекрестках

Авария	Режим движения			
	нерегулируемый		регулируемый	
	$K_{пао}$	δ_a	$K_{пао}$	δ_a
Со смертельным исходом (K^c, δ^c)	8,0	0,0292	10,500	0,0282
С ранениями (K^p, δ^p)	4,0	0,9320	5,000	0,7746
С материальным ущербом (K^m, δ^m)	1,0	0,0388	1,000	0,1972
Суммарно (K^Σ)	4,0	1,0000	4,366	1,0000

Зависимость аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» регулируемого режима от потенциальной опасности показана на рис. 2. Видно, что зависимость аварийности от потенциальной опасности статистически значима и имеет высокую точность прогноза ($E = 0,49$).

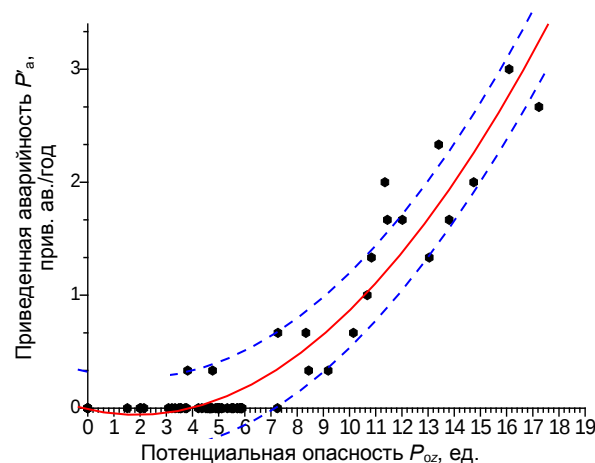


Рис. 2. Зависимость приведенной аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» от потенциальной опасности регулируемого режима:

— — $P'_a = -0,004 - 0,058P_{oz} + 0,014P_{oz}^2$
 ($R = 0,9$; F -критерий = 450,1; $E = 0,49$);
 - - - - границы 90%-го доверительного интервала

Модель прогнозирования аварийности нерегулируемого режима. Структурная формула для расчета потенциальной опасности конфликтной точки имеет следующий вид:

$$P_{\text{о}}^{\text{нр}} = K_{\text{он}}^{0,98} K_{\text{в}}^{1,16} K_{\text{б}}^{1,04} K_{\text{р}}^{0,96} K_{\text{н}}^{1,2} K_{\text{у}}^{1,1} K_{\text{т}}. \quad (11)$$

При определении потенциальной опасности конфликтных точек коэффициенты $K_{\text{он}}$, $K_{\text{в}}$, $K_{\text{р}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{б}}$, $K_{\text{у}}$ и $K_{\text{т}}$ определяются аналогично [1] (нерегулируемый режим).

Потенциальная опасность конфликтной зоны определяется по формуле

$$P_{\text{оз}} = \left[\sum_{k=1}^K (P_{\text{о}} - P_{\text{о0}})_k^{0,7} \right]^{0,8}, \quad (12)$$

где $P_{\text{о0}}$ – порог чувствительности для нерегулируемого режима ($P_{\text{о0}} = 0,63$ ед.).

Вероятное число приведенных аварий вычисляли следующим образом

$$P'_a = 0,267P_{\text{оз}} - 0,364. \quad (13)$$

Вероятное число неприведенных аварий P_a с учетом данных табл. 1 определяли по формуле

$$P_a = \frac{P'_a}{K_{\text{пао}}^{\Sigma}} = 0,25P'_a. \quad (14)$$

Вероятное число аварий со смертельным исходом

$$P_a^c = 0,0292P_a. \quad (15)$$

Вероятное число аварий с ранением

$$P_a^p = 0,9320P_a. \quad (16)$$

Вероятное число аварий с материальным ущербом (неотчетных)

$$P_a^m = 0,0388P_a. \quad (17)$$

Зависимость аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» нерегулируемого режима от потенциальной опасности показана на рис. 3. Видно, что зависимость является статистически значимой и имеет высокую точность прогноза.

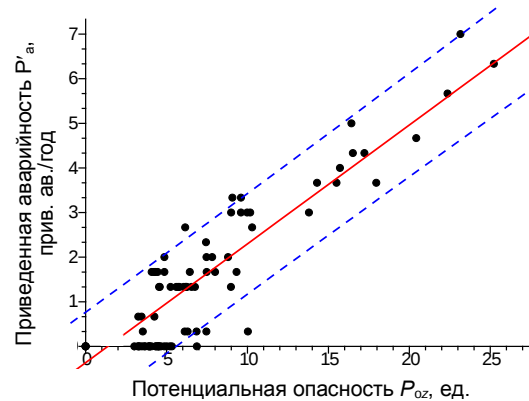


Рис. 3. Зависимость приведенной аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» от потенциальной опасности нерегулируемого режима:

— — $P'_a = 0,267P_{\text{оз}} - 0,364$

($R = 0,83$; F -критерий = 466,7; $E = 0,53$);

- - - границы 90 % доверительного интервала

ВЫВОД

На основании проведенных экспериментальных и аналитических исследований для регулируемых перекрестков разработана методика прогнозирования аварийности по методу конфликтных зон, включающая модели прогнозирования аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» и соответствующие зависимости аварийности от потенциальной опасности конфликтов, учитывающие специфику и опасность конфликтного взаимодействия, что позволяет получить точный прогноз аварийности на стадиях выбора решений, проектирования, реконструкции или функционирования объекта. Исходя из результатов работы представляется целесообразным продолжить исследования по данной тематике. В частности, возможно совершенствование метода «конфликтных зон» внутри групп факторов с помощью разработанных компьютерных программ, а также метода прогнозирования аварийности за счет большей детализации видов конфликтов и введения в расчетную модель фактора скорости и конфликтных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.

2. **Пегин, П. А.** Повышение средней скорости движения транспортных средств на опасных участках дороги / П. А. Пегин // Вестник Тихоокеан. гос. ун-та. – 2011. – № 1 (20). – С. 135–142.

3. **Коржова, А. В.** Анализ аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» в зоне пешеходного перехода / А. В. Коржова, Д. В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. – Минск: БНТУ, 2009. – Т. 2. – С. 268–269.

4. **Кот, Е. Н.** Оценка аварийности в конфликте «поворотный транспорт – пешеход» на регулируемых перекрестках / Е. Н. Кот, Д. В. Капский // Вестник БНТУ. – 2005. – № 4. – С. 39–41.

5. **Пегин, П. А.** Повышение транспортной безопасности: обеспечение видимости дорожных знаков в сложных погодных-климатических условиях / П. А. Пегин, С. В. Борзыкин. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 159 с.

6. **Врубель, Ю. А.** Организация дорожного движения: в 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорог, 1996. – Ч. 1. – 328 с.

7. **Капский, Д. В.** Учет «человеческого фактора» в модели определения потенциальной опасности при прогнозировании аварийности по методу «конфликтных зон» / Д. В. Капский // Вестник Тихоокеан. гос. ун-та. – 2012. – № 2 (25). – С. 123–126.

8. **Rappoport, H. A.** Die Ausbildung Plangeicher Knotenpunkte im Landstrassennetz / H. A. Rappoport // Strassen und Tiefbau. – 1955. – No 8. – P. 499–510.

9. **Crossroad:** свидетельство о регистрации компьютерной программы № 141: C20100015 / Д. В. Капский; дата публ. 04.03.2010.

10. **Врубель, Ю. А.** Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

2. **Pegin, P. A.** (2011) Increase of Vehicle Average Speed at Road Danger Areas. *Vestnik Tihookeanskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of Pacific National University], 1 (20), 135–142 (in Russian).

3. **Korzhova, A. V., & Kapsky, D. V.** (2009) Analysis of Accidents for “Transit Transport – Pedestrian” Conflict Situation in the Zone of Pedestrian Crossing. *Nauka – Obrazovaniiu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Deviatoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Science for Education, Industry and Economics. Proceedings Sed'moj of the 7th International Scientific-Research Conference. Vol. 2]. Minsk, BNTU, 268–269 (in Russian).

4. **Kot, E. N. & Kapsky, D. V.** (2005) Accident Assessment For “Turning Transport – Pedestrian” Conflict at Controlled Intersections. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 4, 39–41 (in Russian).

5. **Pegin, P. A., & Borzykin, S. V.** (2013) *Improvement of Transport Safety: Provision Road Sign Visibility Under Severe Weather and Climate Events*. Khabarovsk: Publishing House of Pacific State University. 159 p. (in Russian).

6. **Vrubel, Yu. A.** (1996) *Organization of Road Traffic*. Part. 1. Minsk: Belarusian Fund of Road Traffic Safety. 328 p. (in Russian).

7. **Kapsky, D. V.** (2012) Account of Human Factor in the Model for Determination of Potential Danger While Forecasting Accidents in Accordance with the “Conflict Zone” Method. *Vestnik Tihookeanskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of Pacific National University], 2 (25), 123–126 (in Russian).

8. **Rappoport, H. A.** (1955) Die Ausbildung Plangeicher Knotenpunkte im Landstrassennetz. *Strassen und Tiefbau* [Roads and Civil Works], 8, 499–510 (German).

9. **Kapsky, D. V.** (2010) Crossroad. Certificate on Registration of Computer Program No 141; C20100015. (in Russian).

10. **Vrubel, Yu. A., Kapsky, D. V., & Kot, E. N.** (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk: BNTU. 240 p. (in Russian).

REFERENCES

1. **Kapsky, D. V.** (2008) *Accident Forecast in Road Traffic*. Minsk: BNTU. 243 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014

КЛАССИФИКАЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ РАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ

*Докт. техн. наук., проф. КАРПУНИН И. И., докт. техн. наук КУЗЬМИЧ В. В.,
инж. БАЛАБАНОВА Т. Ф.*

Белорусский национальный технический университет

E-mail: kuzmich@tyt.by

В результате проведенных исследований установлено, что морфологическая структура крахмальных гранул во многом определяет технологические особенности выделения крахмала из сырья, его модификацию, а также последующее использование. Морфологическая структура гранул крахмала главным образом зависит от вида растительного крахмалосодержащего сырья, из которого он был выделен. Большое влияние на форму и размеры гранул оказывает также сортовая принадлежность сырья. Линейные «легкие» цепи амилозы и «тяжелые» разветвленные цепи амилопектина образуют ультраструктуру крахмальных гранул. Рентгенографические исследования подтвердили, что крахмальные гранулы характеризуются наличием чередующихся аморфных и кристаллических областей. При этом ориентация полимеров путем вытяжки полученного целевого продукта влияет на его физико-механические показатели, которые возрастают в результате ориентации полимеров. Применительно к упаковке ориентация полимерных пленок может решать такие важнейшие задачи, как значительное повышение эксплуатационных свойств, создание термоусадочных пленочных материалов, улучшение качественных показателей утилизированной пленки.

Результаты проведенных исследований полимеров свидетельствуют о том, что для повышения биологической разложимости уже утилизированной упаковки, изготовленной из полимеров, и физико-механических показателей необходимы изменения в технологии. Для этого следует в технологии получения пленок использовать вещества типа крахмала и другие, характеризующиеся большим наличием разветвленных цепей молекул и чередующихся аморфных и кристаллических областей. Это позволит получать прочную и быстро разлагающуюся микроорганизмами уже использованную упаковку.

Ключевые слова: биологически разлагаемый полимер, морфологическая структура, крахмал, сырье.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

CLASSIFICATION OF BIODEGRADABLE POLYMERS

KARPUNIN I. I., KUZMICH V. V., BALABANOVA T. F.

Belarusian National Technical University

The executed investigations have made it possible to ascertain that a morphological structure of starch granules mainly determine technological peculiarities of starch isolation from raw material, its modification and its later use. Morphological structure of starch granules primarily depends on type of plant starch-containing raw material which has been used for its isolation. Class of raw material exerts a strong impact on the shape and size of the granules. Linear "light" amylose chains and "heavy" amylopectin branch chains form a starch granule ultrastructure. X-ray research has proved that starch granules are characterized by presence of interlacing amorphous and crystalline regions. In this case polymer orientation using stretching of the obtained end product influences on its physical and mechanical indices which are increasing due to polymer orientation. For the purpose of packaging orientation of polymer films can solve such important problems as significant improvement of operational properties, creation of thermosetting film materials, improvement of qualitative indices of the recycled film.

Results of the conducted research have proved the fact that it is necessary to make changes in technology in order to increase biological degradability of the recycled packaging made from polymers and improve physical and mechanical indices. In this regard film production technology presupposes usage of such substances as starch and others which are characterized by rather large presence of branch chains of molecules and interlacing amorphous and crystalline regions. Such approach makes it possible to obtain after-use package which is strong and quickly degradable by micro-organisms.

Keywords: biodegradable polymer, morphological structure, starch, raw material.

Fig. 3. Tab. 2. Ref.: 12 titles.

Сегодня человечество столкнулось с угрожающими и практически всеобъемлющими экологическими проблемами, которые нельзя

оставить без внимания, так как их последствия могут оказаться фатальными для всей мировой цивилизации. Загрязнение окружающей среды

твердыми отходами играет не последнюю роль в усугублении сложившейся ситуации, которую может улучшить повсеместное введение биологически разлагаемых полимеров. С целью создания широкого спектра биологически разлагаемых полимерных материалов за рубежом объединяют усилия такие организации, как Международная ассоциация биоразлагаемых полимеров (IBAW) и Институт оксибиоразлагаемых пластмасс (OPI).

Обострение экологической обстановки в окружающем мире нарастает. Радикальным решением проблемы «полимерного мусора», по мнению специалистов, является создание и освоение широкой гаммы полимеров, способных при соответствующих условиях подвергаться биodeградации с образованием безвредных для живой и неживой природы веществ. Именно биологическая разлагаемость высокомолекулярных веществ и будет тем приоритетным направлением разработки, которое позволит исключить значительное число проблем «пластмассового мусора» [1–3].

Биологическая разлагаемость – способность материала разрушаться в естественных условиях под действием микроорганизмов (бактерий и грибов), ультрафиолета, радиации, что приводит к микробному усвоению этого материала. Полимер обычно считается биологически разлагаемым, если вся его масса разлагается в земле или воде за полгода. Однако ведутся споры относительно того, какой промежуток времени можно считать приемлемым для биологического разложения. Скорость разложения зависит от ряда факторов: типа полимеров, типа и концентрации разлагающих материалов, влажности, температуры и ряда других. Продуктами разложения являются углекислый газ, вода и биомасса (или в случае анаэробного биологического разложения – углекислый газ, метан и биомасса) [1, 4, 5].

Отрасль биологически разлагаемых полимеров в последние 20 лет достигла внушительных темпов роста. Из всего многообразия можно назвать две наиболее общие классификации биополимеров:

1) в зависимости от типов разложения пластиков выделяются следующие группы:

а) биологически разлагаемые полимеры – природные полимеры и вещества, получаемые на основе природных полимеров: целлюлоза,

крахмал, натуральный каучук, полибутиролактон. Они подвергаются минерализации на 100 %;

б) полимеры, подверженные биологической деструкции, – синтетические полимеры (сложные полиэфиры и полиамиды);

в) материалы, которые могут подвергаться биологической эрозии, – сополимеры и смеси полимеров, содержащие в своем составе материалы первой группы (сополимеры этилена с винилацетатом, сополимеры этилена и пропилена, сополимеры этилена и винилового спирта, полиэтилен с крахмалом и пр.) [3, 6–8];

2) в зависимости от метода синтеза полимеров.

Вторая классификация является наиболее всеобъемлющей, схема ее представлена на рис. 1.

Все биополимеры можно объединить в две большие группы: агрополимеры (первая категория) и биологически разлагаемые полиэстеры, или биополиэстеры (2–4 категорий). К основным видам агрополимеров относятся полисахариды и протеины. Они являются достаточно традиционными для улучшения мультифазных материалов. Полисахариды – самые распространенные макромолекулы в биосфере. Эти сложные углеводы состоят из гликозидных связей и зачастую являются одним из основных структурных элементов экзоскелета растений и животных (целлюлоза, каррагинан, хитин и пр.). Наиболее перспективные, с точки зрения использования в качестве сырья для биоразлагаемых полимеров, – это крахмал, хитин, хитозан и пектин.

Крахмал извлекается преимущественно из зерновых культур (пшеницы, кукурузы, риса) и из клубней (картофель, маниока). Он содержится в семенах или корнях и представляет собой основной запас энергии растений. Главными компонентами крахмала являются два полимера α -D-глюкопиранозы: амилоза и амилопектин (рис. 2). В цепи амилозы имеются α -1,4-гликозидные связи с линейной структурой, в цепи амилопектина, кроме α -1,4-гликозидных связей, – α -1,6-гликозидные связи с разветвленной структурой. Содержание амилозы в нативном крахмале, как правило, составляет от 15 до 40 %, а доля амилопектина – 60–85 %. Соотношение содержания этих полимеров и их структура обуславливают основные физико-химические свойства крахмала.

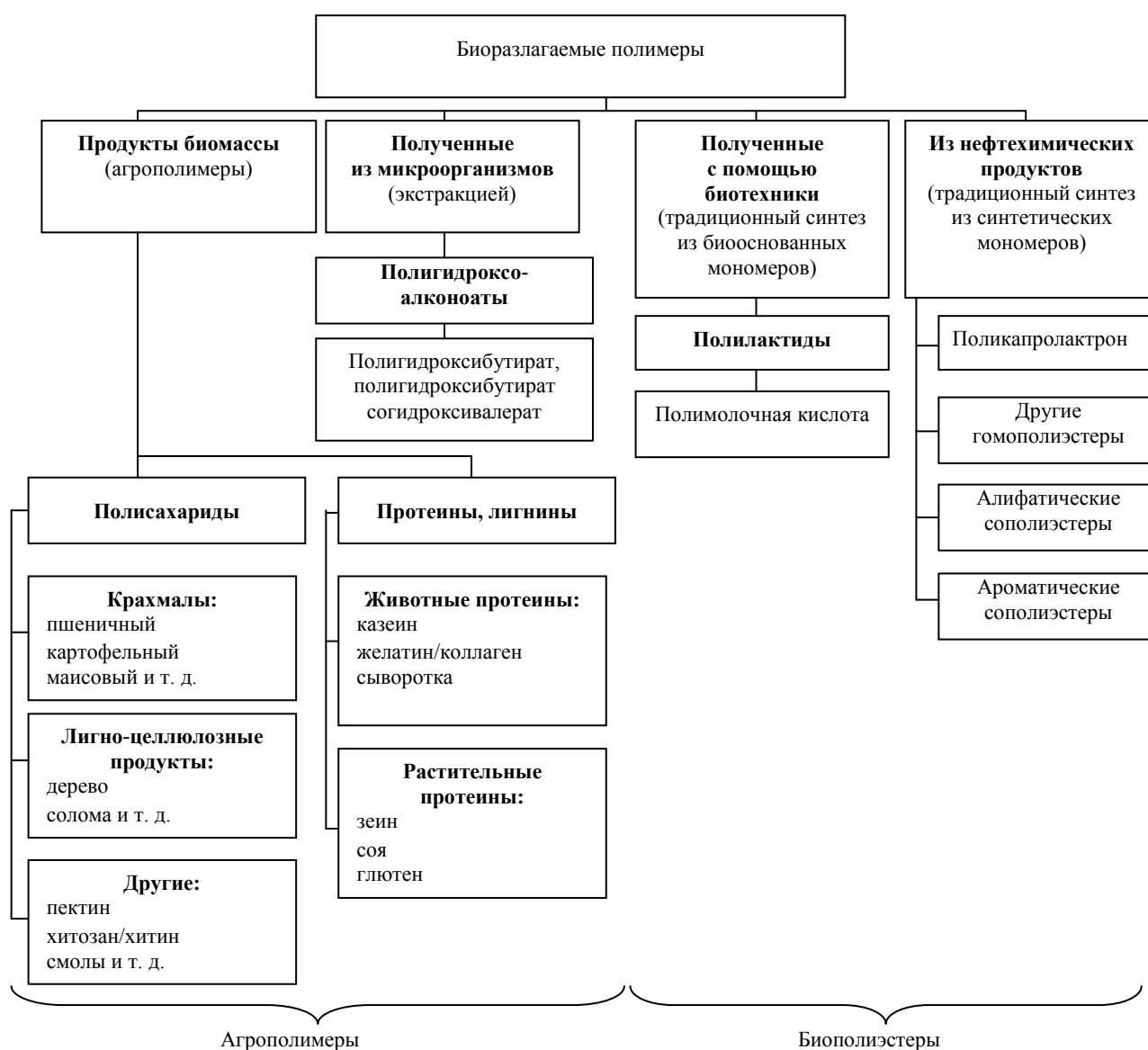


Рис. 1. Классификация биологически разлагаемых полимеров

Полимеры крахмала объединяются в дискретные крахмальные гранулы, которые имеют овальную, сферическую или неправильную форму, их диаметр колеблется в пределах 0,002–0,150 мм. Крахмальные зерна разделяются на простые и сложные: простые представляют собой однородные образования, сложные – сочетание более мелких частиц. Морфологическая структура крахмальных гранул во многом определяет технологические особенности выделения крахмала из сырья, его модификации, а также последующего использования. Морфологическая структура гранул крахмала главным образом зависит от вида растительного крахма-

лосодержащего сырья, из которого он был выделен. Большое влияние на форму и размеры гранул оказывает также сортовая принадлежность сырья.

Линейные «легкие» цепи амилозы и «тяжелые» разветвленные цепи амилопектина образуют ультраструктуру крахмальных гранул. Рентгенографические исследования подтвердили, что крахмальные гранулы характеризуются наличием чередующихся аморфных и кристаллических областей, образованных основными полимерами крахмала.

Существуют различные гипотезы структурной организации крахмальных гранул. Модель

Дональда [6–8] объясняет формирование кристаллических областей путем совместной кристаллизации макромолекул амилозы с боковыми цепями амилопектина. Согласно гипотезе Гидли [7–12] кристаллические ламели образованы упорядоченной фракцией амилопектина, а цепи амилозы, ориентированные поперек направления чередования ламелей, формируют аморфные области. Последние исследования подтверждают гипотезу о том, что связанные цепи амилозы распределены и в аморфных, и в кристаллических ламелях. При этом отдельные цепи амилозы в кристаллической области образуют одномерные структуры – «нити», а в аморфной части имеют неупорядоченную структуру.

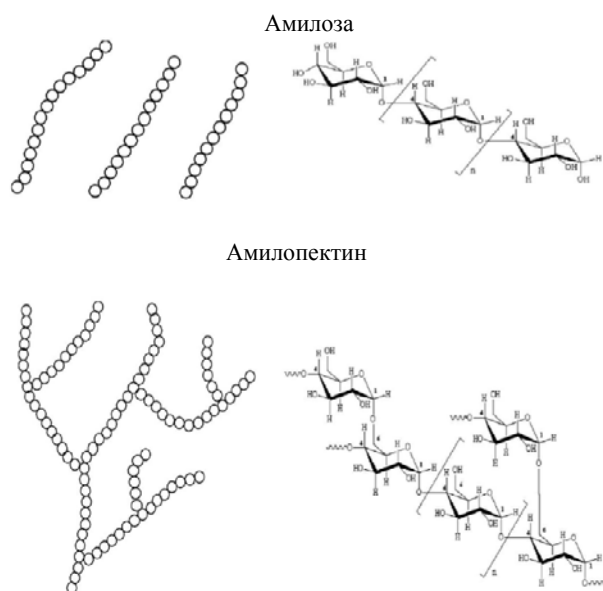


Рис. 2. Полисахариды крахмала

Степень кристалличности природного крахмала зависит от его происхождения и составляет 15–45 %. Молекулярный уровень строения крахмала и морфологические характеристики крахмальных гранул обуславливают такие его свойства, как температура клейстеризации, растворимость, ретроградация, набухаемость крахмальных гранул, а также реологические свойства крахмальных клейстеров. Известно, что у нативного крахмала А-цепи амилопектина образуют двойные спирали, которые упакованы в кристаллические ламели (кластеры), а В-цепи обеспечивают соединение кластеров. Точки разветвления А- и В-цепей находятся в аморфной ламели. Молекулярная архитектура аморф-

ных колец в настоящее время не вполне известна. Предполагают, что молекулы амилозы и амилопектина находятся друг с другом в неупорядоченной конформации. В полукристаллических кольцах разветвленные молекулы амилопектина организуются в кристаллическую структуру второго уровня и аморфную ламель.

Кристаллическая ламель соответствует областям, в которых содержатся упорядоченные двойные спирали амилопектина, тогда как аморфная ламель соответствует точкам разветвления амилопектина. Суммарная толщина кристаллической и аморфной ламелей для всех крахмалов составляет примерно 9–10 нм, а толщина кристаллической ламели для амилопектиновых и нормальных крахмалов – 5–6 нм, тогда как аморфной ламели – 3–4 нм. Считается, что структура кристаллической решетки крахмала зависит от его ботанического происхождения. Так, амилопектиновые крахмалы зерновых культур обладают А-типом кристаллической решетки, в то время как высокоамилозные крахмалы – В-типом, хотя существуют и другие точки зрения.

Таким образом, крахмалы различного ботанического происхождения отличаются строением и формой крахмальных гранул, а также соотношением содержания амилозы и амилопектина. Эти характеристики обуславливают значительные различия их физико-химических свойств, а также различия в технологии выделения крахмала из сырья. Наличие неотделимых примесей белка и жира также влияет на их органолептические и технологические свойства.

Традиционным сырьем для производства крахмала в Республике Беларусь является картофель. Два предприятия производят крахмал из кукурузы. Однако нативные крахмалы не всегда обеспечивают достижение требуемых свойств конечных продуктов, поэтому модифицированные крахмалы находят сегодня все большее применение. Вид сырья, из которого получен модифицированный крахмал, – важный фактор, влияющий на его свойства. Так как крахмалы различного ботанического происхождения отличаются строением, составом и свойствами, они по-разному ведут себя под действием модифицирующих факторов. Модифицированные крахмалы из кукурузы, как пра-

вило, являются экономичным решением. В мире большинство модифицированных крахмалопродуктов, главным образом для технических целей, получают из кукурузного крахмала. Картофельные модифицированные крахмалы превосходят кукурузные, так как образуют более прозрачные и стабильные клейстеры, не имеющие сильного запаха и привкуса. Картофельный крахмал содержит большое количество линейных полимеров амилозы, что придает ему хорошие пленкообразующие свойства.

В качестве основного материала для проведения исследований был выбран полиэтилен высокого давления. Пленка предназначалась для упаковки различных изделий промышленного назначения, обладала высокой механической прочностью, выпускалась в виде полотна, намотанного на картонную втулку. По внешнему виду – прозрачная, не имеющая трещин, запрессованных складок, разрывов и отверстий. Допускалось наличие геликов в пределах допуска на применяемый полиэтилен. Использовали полиэтилен высокого давления (ПЭВД) промышленного производства, модифицированный крахмал (ТУ-9187-144-00008064-97), глицерин (ГОСТ 6259-75) (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики ПЭВД

Наименование показателя	Значение
Плотность, г/см ³	0,950–0,955
Показатель текучести расплава, г/10 мин	0,40–0,65
Разброс показателя текучести расплава в пределах партии, %, не более	10
Число включений, шт., не более	5
Массовая доля золы, %, не более	0,04
Массовая доля летучих веществ, %, не более	0,09
Прочность при разрыве, МПа, не менее	29,4
Предел текучести при растяжении МПа, не менее	22,6
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	700
Массовая доля гранул размером менее 2 мм и от 5 до 8 мм, %, не более	1

В качестве связующего и пластификатора в композицию крахмала и ПЭВД были введены мочевины и глицерин в следующих пропорциях:

1) ПЭВД – 88 %; крахмал – 5 %; мочевины – 4 %; глицерин – 3 %;

2) ПЭВД – 83 %; крахмал – 10 %; мочевины – 4 %; глицерин – 3 %;

3) ПЭВД – 73 %; крахмал – 20 %; мочевины – 4 %; глицерин – 3 %;

4) ПЭВД – 68 %; крахмал – 25 %; мочевины – 4 %; глицерин – 3 %.

Методы определения физико-механических и прочих характеристик конструкционных и пленочных полимерных материалов разработаны достаточно основательно и подробно изложены в соответствующих государственных стандартах. Получаемые в результате этих испытаний показатели используются для решения конкретных, специальных задач. В настоящее время в странах СНГ и за рубежом созданы и выпускаются специализированные и универсальные микропроцессорные приборы и установки для экспрессных измерений физико-механических показателей полимерных материалов.

В экспериментальных исследованиях авторов был задействован экструдер, в котором использовали метод экструзии пленки с раздувом рукава (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальный экструдер

В процессе экструзии происходило непрерывное превращение термопластичного материала в виде гранул в пленку. Последовательность стадий процесса экструзии выглядела следующим образом:

1) пластикация сырья в виде гранул или порошка;

2) дозирование пластицированного расплава через фильеру, которая придает ему требуемую форму, например рукава;

3) охлаждение и фиксирование требуемой формы;

4) намотка в рулоны.

Стадии 1 и 2 происходили в экструдере, стадии 3 и 4 были вспомогательными. В результате проведенных исследований установлено, что морфологическая структура крахмальных гранул во многом определяет технологические особенности выделения крахмала из сырья, его модификацию, а также последующее использование. Морфологическая структура гранул крахмала главным образом зависит от вида растительного крахмалосодержащего сырья, из которого он был выделен. Большое влияние на форму и размеры гранул оказывает также сортовая принадлежность сырья. Линейные «легкие» цепи амилозы и «тяжелые» разветвленные цепи амилопектина образуют ультраструктуру крахмальных гранул. Рентгенографические исследования подтвердили, что крахмальные гранулы характеризуются наличием чередующихся аморфных и кристаллических областей.

Результаты по определению физико-механических показателей ориентированной и неориентированной пленок, полученных из неупотребленного и использованного сырья, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения физико-механических показателей пленки

Вид пленки	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	
	Первичная пленка	Вторичная пленка	Первичная пленка	Вторичная пленка
Полиэтиленрефталатная				
Неориентированная	40	24	450	323
Двухосноориентированная	165	112	115	81
Одноосноориентированная	525	394	–	–
Полистирольная				
Неориентированная	27–52	14–35	1,5–4,5	0,8–2,2
Двухосноориентированная	115–128	91–122	71	41
Полипропиленовая				
Неориентированная	48–59	25–37	63–79	45–61
Двухосноориентированная	110–228	82–144	29–55	15–31

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что ориентация полимеров путем вытяжки полученного целевого продукта влияет на его физико-механические показатели, которые возрастают в результате ориентации полимеров. Применительно к упаковке ориентация полимерных пленок может решать такие важнейшие задачи, как значительное повышение эксплуатационных свойств, создание термоусадочных пленочных материалов, улучшение качественных показателей утилизированной пленки.

ВЫВОД

Результаты проведенных исследований полимеров свидетельствуют о том, что для повышения биологической разложимости уже утилизированной упаковки, изготовленной из полимеров, и физико-механических показателей необходимы изменения в технологии. Для этого следует в технологии получения пленок использовать вещества типа крахмала и другие, характеризующиеся большим наличием разветвленных цепей молекул и чередующихся аморфных и кристаллических областей. Это позволит получать прочную и быстро разлагающуюся микроорганизмами уже использованную упаковку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клиников, А. С. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов: учеб. пособие / А. С. Клиников, П. С. Беляев, М. В. Соколов. – Тамбов: Гос. ун-т, 2005. – 80 с.
2. Ма, Х.-Ф. Hydrogen Bond of Thermoplastic Starch and Effects on Its Properties / X.-F. Ma, J.-G. Yu // Acta Chimica Sinica. – 2004. – Vol. 62, № 12. – P. 1180–1184.
3. Шварц, О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт; под общ. ред. А. Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.
4. Раувендааль, К. Экструзия полимеров: пер. с англ. яз. 4-го изд-я / К. Раувендааль. – Санкт-Петербург: Профессия, 2008. – 768 с.
5. Вторичная переработка пластмасс / ред. Ла Мантия Франческо, ред. перевода Г. Е. Заиков. – СПб.: Профессия, 2007. – 400 с.
6. Гуль, В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – М.: Химия, 1978. – 328 с.
7. Малкин, А. Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин, А. А. Аскадский, В. А. Коврига. – М.: Химия, 1978. – 336 с.
8. Пластмассы. Метод определения механических динамических свойств с помощью крутильных колебаний: ГОСТ 20812–83. – Взамен ГОСТ 20812–75; введ. 01.01.84 до 01.01.91. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

9. **Пластмассы**, полимеры и синтетические смолы. Химические наименования, термины и определения: ГОСТ 24888–81. – Введ. 01.07.82. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 18 с.

10. **Власов, С. В.** Биоразлагаемые полимерные материалы / С. В. Власов, В. В. Ольхов // Полимерные материалы. – 2006. – № 7. – С. 23–26.

11. **Васнев, В. А.** Биоразлагаемые полимеры / В. А. Васнев // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. – 1997. – Т. 39, № 12. – С. 2073–2086.

12. **Локс, Ф.** Упаковка и экология: учеб. пособие / Ф. Локс; перевод с англ. – М.: МГУП, 1999. – 220 с.

REFERENCES

1. **Klinkov, A. S., Belyaev, P. S., & Sokolov, M. V.** (2005) *Recovery and Recycling of Polymer Materials*. Tambov: State University. 80 p. (in Russian).

2. **Ma, X.-F., & Yu, J.-G.** (2004) Hydrogen Bond of Thermoplastic Starch and Effects on Its Properties. *Acta Chimica Sinica*, 62 (12), 1180–1184.

3. **Shvarts, O., Jebeling, F.-V., & Furt, B.** (2005) *Plastics Processing*. Saint-Petersburg, Professia. 320 p. (in Russian).

4. **Rauwendaal, Ch.** (2014) *Polymer Extrusion*. 5th Edition. Munich, Hanser Publishers. 934 p. (Russ. ed.: Rauwendaal, K. (2008). *Ekstruziia polimerov*. 4th ed. Saint-Petersburg, Professia. 768 p.).

5. **La Mantia, F.** (1993) *Plastics Recycling*. Toronto, ChemTec Publishing. 194 p. (Russ. ed.: La Mantia, F. (2007). *Vtorichnaia Pererabotka Plastmass*. Saint-Petersburg, Professia. 400 p.).

6. **Gul, V. E.** (1978) *Structure and Strength of Polymers*. Moscow, Khimia. 328 p. (in Russian).

7. **Malkin, A. Ya., Askadsky, A. A., & Kovriga, V. A.** (1978) *Methods for Measuring Mechanical Properties of Polymers*. Moscow, Khimia. 336 p. (in Russian).

8. **State Standard 20812–83.** Plastics. Method for Determination of Mechanical Dynamic Properties with the Help of Torsional Oscillations. Moscow, Publishing House of Standards, 1983. 6 p. (in Russian).

9. **State Standard 24888–81.** Plastics, Polymers and Synthetic Resins. Chemical Names, Terms and Definitions. Moscow, Publishing House of Standards, 1981. 18 p. (in Russian).

10. **Vlasov, S. V., & Olkhov, V. V.** (2006) Biodegradable Polymer Materials. *Polimernye Materialy* [Polymer Materials], 7, 23–26 (in Russian).

11. **Vasnev, V. A.** (1997) Biodegradable Polymers. *Vysokomolekuliarnye Soedineniia. Ser. B.* [High-Molecular Compounds. Series. B., 39 (12), 2073–2086 (in Russian).

12. **Lox, F.** (1999) *Packing and Ecology*. Moscow: Mogilev State University of Food Technologies. 220 p. (in Russian).

Поступила 09.09.2014

УДК 656.13

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИГОРОДНОГО СООБЩЕНИЯ

Канд. техн. наук ГРИГОРОВА Т. М.

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

E-mail: tagrigorova@yandex.ua

Рассмотрены вопросы, позволяющие решать задачу организации транспортного обслуживания жителей пригорода с учетом транспортной утомляемости пассажиров как одного из неосознанных критериев выбора способа передвижения. При улучшении процесса перевозки спрос на услугу возрастет. Спрос предопределяет предложение, а от соотношения спроса и предложения зависит ситуация на рынке. Проведен анализ подходов к оценке параметров транспортной системы перевозки пассажиров в пригородном сообщении с учетом влияния параметров транспортного процесса на уровень транспортной утомляемости пассажиров. Этот уровень оценивается через значение показателя активности регуляторных систем пассажира при выполнении каждого элемента процесса перемещения. Изменение показателя активности регуляторных систем пассажира при проезде стоя в салоне транспортного средства пригородного сообщения описано нелинейным регрессионным уравнением, в котором в качестве переменных выступают значение показателя активности регуляторных систем до начала проезда, возраст пассажира, время проезда, коэффициент использования вместимости транспортного средства и отношение стоимости нового автобуса к номинальной вместимости.

Предложена модель изменения показателя оценки транспортной утомляемости пассажиров при проезде стоя в транспортном средстве, которая показала, что влияние показателя активности регуляторных систем пассажира до начала выполнения элемента движения является существенным, так как он описывает исходное состояние человека перед выполнением следующего элемента. Воздействие показателя активности регуляторных систем пассажира до начала выполнения элемента движения также существенно, поскольку влияет на состояние пассажира после выполнения предыдущих элементов движения. Влияние возраста на адаптивные свойства организма отрицательно. Время движения также оказывает негативное воздействие на показатель активности регуляторных систем. Определено, что больший уровень эргономичности транспортного средства способствует уменьшению усталости во время проезда.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, транспортная утомляемость, модель, статистическая значимость.

Библиогр.: 10 назв.

OPTIMIZATION PROBLEMS ON SUBURBAN TRANSPORT SYSTEMS

GRIGOROVA T. M.

Kharkov National Academy of Municipal Economy named after A. N. Beketov

The paper considers problems that permit to solve such issue as organization of transport service for suburban population with due account of passenger transport fatigue which is considered as one of subconscious criteria for selection of a travel mode. Improvement of transportation process entails an increase in demand for such service. Demands predetermine transport supply and situation on the market depends on supply-and-demand balance. The paper presents an analysis of approaches to the estimation of parameters for a suburban transport system with due regard for influence of transport process parameters on the rate of passenger transport fatigue. This rate is estimated through value of an index which demonstrates an activity of passenger's regulatory systems while performing every element of motion process. Nonlinear regression equation has been used to describe changes in the activity index of the passenger's regulatory systems when a passenger is taking a standing position in a passenger compartment of a suburban transport facility. In this case value of activity index of regulatory systems before transportation, passenger age, transportation duration, operation factor of transport capacity and ratio of new bus cost to nominal capacity have been taken as variables for calculations.

The paper proposes an index change model for assessment of passenger's transport fatigue when a passenger has a standing position in a transport facility. The model has shown that an impact of the activity index of passenger's regulatory systems before making any elemental motion is rather pertinent because this index provides information on an initial condition of a person before executing any other elemental motion. The influence of the activity index of passenger's regulatory systems before making any elemental motion is considered as an important characteristic because it has an impact on passenger's condition after executing previous elemental motions. Effects of age on organism adaptive properties are negative. Transport duration has also negative effect on the activity index of regulatory systems. It has been determined that a higher level of transport facility ergonomics helps to reduce fatigue during the travel.

Keywords: passenger transportation, transport fatigue, model, statistical significance.

Ref.: 10 titles.

Введение. Одной из важнейших задач организации транспортного обслуживания населения является определение технологических параметров процесса перевозки пассажиров [1]. При улучшении процесса перевозки спрос на услугу возрастет. Спрос предопределяет предложение, а от соотношения спроса и предложения зависит ситуация на рынке. Особенно актуальное значение это имеет для организации процесса перевозки пассажиров в пригородном сообщении, вследствие того что система организации транспортного обслуживания жителей пригорода находится в стадии реорганизации и не отвечает современным требованиям управления транспортными комплексами.

При организации перевозки пассажиров в городском, пригородном и междугородном циклах общественно необходимые затраты на перевозку не являются высокорентабельными. Существующие пассажиропотоки определяют спрос населения на перевозки [2–4]. При этом основной фактор при анализе спроса и рынка транспортных услуг – установление исходных предпосылок, определяющих поведение пассажира [1]. Человек выбирает тот способ перемещения, который имеет наименьшую стоимость. Однако данный вывод исследователи считают не совсем верным, так как при этом

происходит отрыв стоимости услуги от ее полезности [5–7]. Когда потребитель не может оценить абсолютную величину полезности, он ориентируется на соотношение полезности двух или более наборов услуг [7]. Другие исследователи приводили данные, что на выбор пассажирами способа передвижения в городах влияет их транспортная утомляемость [1]. Транспортная утомляемость пассажира – один из критериев неосознанного выбора способа передвижения. При улучшении процесса перевозки спрос на услугу возрастет. Однако для пригородного сообщения эти вопросы изучены еще не были.

Цель исследований автора – рассмотрение механизма адаптации параметров технологического процесса перевозки пассажиров в пригородном сообщении к параметрам транспортной утомляемости пассажиров. Для достижения поставленной цели возникает необходимость в выявлении и обосновании факторов, влияющих на транспортную утомляемость в пригородном сообщении.

Формализация процесса учета транспортной утомляемости при организации транспортного обслуживания жителей пригорода. Исходя из цели исследований создали такую математическую модель, которая позво-

лила повысить эффективность транспортного процесса перевозки пассажиров в пригородном сообщении с учетом их транспортной утомляемости. Критерием оптимизации являлись доходы общества от перевозки в пригородном сообщении с учетом транспортной утомляемости пассажиров. Транспортная утомляемость – сложная функция, которая зависит от целого ряда групп факторов

$$ТУ = f(\Pi, B, E), \quad (1)$$

где ТУ – транспортная утомляемость пассажира; Π – группа психофизиологических факторов, характеризующая пассажира, его пол, возраст, исходное функциональное состояние, семейное положение и т. д.; B – группа факторов, качественно и количественно характеризующая условия поездки; E – группа экономических факторов, отражающая соотношение между стоимостью поездки и ее результатом.

Изменяя факторы данных групп, можно влиять на результаты выбора способа передвижения. Причем уровень развития экономики Украины определяет значение факторов экономической группы, и влиять на их существующие величины возможно только в масштабах страны. Уровень развития науки в настоящее время пока не позволяет в полном объеме воздействовать на значения факторов психофизиологической группы. Таким образом, реально влиять на выбор пассажирами способа передвижения можно только за счет изменения значений факторов, качественно и количественно характеризующих их условия поездки. Вследствие этого транспортную утомляемость, которая возникает у пассажиров при пользовании общественным транспортом, можно описать следующей функцией:

$$ТУ = f(t_{\text{под}}, t_{\text{ож}}, t_{\text{дв}}), \quad (2)$$

где $t_{\text{под}}$ – время подхода пассажиров к остановочному пункту; $t_{\text{ож}}$ – время ожидания пассажирами транспортного средства; $t_{\text{дв}}$ – время движения пассажиров в транспортном средстве.

Оценить транспортную утомляемость пассажиров можно путем определения интегрального критерия оценки функционального состояния человека – показателя активности регуляторных систем, который отражает общую реакцию организма на воздействие факторов

внешней среды. Данный показатель характеризует напряжение информационных каналов регуляции в организме человека и реакцию этих каналов на воздействие факторов внешней среды. Его значение можно определить путем обработки электрокардиограммы человека [1, 3]. На первом этапе было проведено исследование влияния параметров поездки при проезде стоя в салоне транспортного средства пригородного сообщения на изменение транспортной утомляемости пассажиров.

Для получения исходной информации проводили натурные наблюдения, при которых у пассажиров фиксировали электрокардиограмму и одновременно определяли параметры поездки. На основании полученной информации провели математическое описание функциональной связи между показателем активности регуляторных систем пассажира и факторами, которые на него влияют. Среди всех методов, позволяющих проводить математическое описание изменения показателя активности регуляторных систем пассажиров пригородного транспорта, выбраны методы регрессионного и корреляционного анализа [8–10].

Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Pi_{\Pi}^{\text{двст}} = 0,03 \left(\left(\Pi_{\text{до}}^{\text{двст}} \right)^2 (\log(B_{\Pi})) \right) + \\ + 0,13 (\gamma t_{\text{дв}}^{\text{ст}}) (2,8 / \Pi / N_{\text{м}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{до}}^{\text{двст}}$ – показатель активности регуляторных систем до начала движения, баллы; B_{Π} – возраст пассажира, годы; γ – коэффициент использования вместимости; $t_{\text{дв}}^{\text{ст}}$ – время движения, мин; $\Pi / N_{\text{м}}$ – отношение стоимости нового автобуса к номинальной вместимости, тыс. у. е./м. н.

Статистическую значимость модели определяли с использованием критерия Фишера, коэффициента множественной корреляции и средней ошибки аппроксимации. Было выявлено, что значения всех показателей соответствуют допустимым пределам.

Из анализа модели (1) сделаны соответствующие выводы. Влияние показателя активности регуляторных систем пассажира до начала выполнения элемента движения существенно, так как он обуславливает состояние

пассажира после выполнения предыдущих элементов движения и описывает исходное состояние человека перед выполнением следующего элемента. Чем больше показатель активности регуляторных систем человека до начала движения, тем больше значение показателя активности регуляторных систем после выполнения этого элемента. Влияние показателя активности регуляторных систем пассажира до начала выполнения элемента движения также существенно, поскольку имеет воздействие на состояние пассажира после выполнения предыдущих элементов движения.

Влияние возраста на адаптивные свойства организма отрицательно. Чем выше возраст пассажира, тем больше будет усталость. Это объясняется ухудшением работы систем организма человека с возрастом, что является естественным процессом. Поэтому чем старше человек, тем большее воздействие на адаптивные свойства организма оказывает транспорт.

Время движения также негативно влияет на показатель активности регуляторных систем. С течением времени накапливается усталость, связанная с длительным нахождением в не очень удобной и почти статической позе стоя. Кроме того, это связано с динамическими свойствами транспортного средства и дорожными условиями. При проезде стоя на пассажира больше влияют колебания, связанные с движением транспортного средства. Более заметными становятся дефекты дорожного покрытия и большее воздействие оказывают погодные и дорожные условия. Все эти факторы влияют на развитие усталости пассажира.

Коэффициент использования вместимости транспортного средства оказывает существенное воздействие на состояние пассажира, едущего стоя. Ведь чем больше данный коэффициент, тем меньше остается личного пространства для пассажира. Это значительно ограничивает возможность изменять позу при стоянии, разминать мышцы и тем самым уменьшать влияние условий поездки на свой организм.

Отношение стоимости нового автобуса к номинальной вместимости характеризуют эргономические свойства транспортного средства, большая эргономичность которого способствует уменьшению усталости во время проезда.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ подходов к оценке параметров транспортной системы перевозки пассажиров в пригородном сообщении показал, что они не полностью учитывают влияние параметров транспортного процесса на уровень транспортной утомляемости пассажиров. Этот уровень можно оценить через значение показателя активности регуляторных систем пассажира при выполнении каждого элемента процесса перемещения.

2. Выявлено, что изменение показателя активности регуляторных систем пассажира при проезде стоя в салоне транспортного средства пригородного сообщения с достаточной точностью описывается нелинейным регрессионным уравнением, в котором в качестве переменных выступают: значение показателя активности регуляторных систем до начала проезда, возраст пассажира, время проезда, коэффициент использования вместимости транспортного средства и отношение стоимости нового автобуса к номинальной вместимости. Направлением дальнейших исследований является описание изменения показателя активности регуляторных систем пассажиров при выполнении других элементов перемещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доля, В. К. Пасажирські перевезення / В. К. Доля. – Харьков: Видавництво «Форт», 2011. – 504 с.
2. Спирин, И. В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками / И. В. Спирин. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
3. Давідіч, Ю. О. Проектування автотранспортних технологічних процесів з урахуванням психофізіології водіїв / Ю. О. Давідіч. – Харків: ХНАДУ, 2006. – 292 с.
4. Пассажирские автомобильные перевозки / В. А. Гудков [и др.]; под ред. В. А. Гудкова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 448 с.
5. Вербицька, В. І. Планування бюджетної підтримки підприємств міського пасажирського транспорту (На прикладі автобусного транспорту м. Харкова): автореф. дис. ... канд. екон. наук: 08.02.03 / В. І. Вербицька. – Харків: ХНАДУ, 2002. – 20 с.
6. Котельников, Р. В. Один из методов подбора весовых коэффициентов в задачах принятия решения на основе функций полезности / Р. В. Котельников // Кибернетика и технологии XXI в.: тез. докл. Междунар. конф. – Воронеж: ВГУ, 2000. – С. 185–190.
7. Котлер, Ф. Маркетинг, менеджмент: анализ, планирование, внедрение, контроль / Ф. Котлер. – СПб.: Питер, 1998. – 888 с.

8. **Галушко, В. Г.** Вероятностно-статистические методы на автотранспорте / В. Г. Галушко. – Киев: Вища шк., 1976. – 232 с.

9. **Конин, И. В.** Разработка метода оценки сложности автобусных маршрутов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / И. В. Конин. – М.: МАДИ, 1993. – 24 с.

10. **Гаврилов, Э. В.** Эргономика на автомобильном транспорте / Э. В. Гаврилов. – К.: Техника, 1976. – 152 с.

REFERENCES

1. **Dolia, V. K.** (2011) *Passenger Transportation*. Kharkov.: Publishing House "Fort". 504 p. (in Ukrainian).

2. **Spirin, I. V.** (2003) *Organization and Management of Passenger Transportation*. Moscow, Publishing Centre "Akademika". 400 p. (in Russian).

3. **Davidich, Yu. O.** (2006) *Development of Automotive Technical Processes with due Account of Driver's Psychophysiology: Monograph*. Kharkov: Kharkov National Automobile and Highway University. 292 p. (in Ukrainian).

4. **Gudkov, V. A.,** Mirotin, L. B., Vel'mozhin, A. V., & Shiriaev, S. A. (2004) *Passenger Automotive Transportation*. Moscow, Goryachaya linia Telecom. 448 p. (in Russian).

5. **Verbitskaya, V. I.** (2002) *Planning of Budgetary Support for Organizations of Local Passenger Transport (Kharkov bus Transport Taken as an Example)*. Author's Abstract of PhD Thesis Research. Kharkov: Kharkov National Automobile and Highway University. 20 p. (in Russian).

6. **Kotelnikov, R. V.** (2000) One of the Methods for Selection of Weight Coefficients in Order to Take Decisions on the Basis of Utility Function. *Kibernetika i Tekhnologii XXI vek: Tezisy Dokladov Mezhdunarodnoi Konferentsii* [Computer Science and Technologies of the XXI Century: Proceedings of International Conference]. Voronezh: Voronezh State University, 185–190 (in Russian).

7. **Kotler, F.** (1998) *Marketing, Management: Analysis, Planning, Introduction, Control*. Saint-Petersburg, Piter. 888 p. (in Russian).

8. **Galushko, V. G.** (1976) *Probabilistic and Statistical Methods for Automotive Transportation*. Kiev, Vysshaya Shkola. 232 p.

9. **Konin, I. V.** (1993) *Development of Method for Assessment of Bus Route Complexity*. Author's Abstract of PhD Thesis Research [Engineering]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction University. 24 p. (in Russian).

10. **Gavrilov, E. V.** (1976) *Ergonomics in Automotive Transport*. Kiev, Tekhnika. 152 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014

УДК 539.4

МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНЗОВИДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЕ МАГНИТНОГО СПЛАВА Ni_2MnGa , ОБЛАДАЮЩЕГО СВОЙСТВОМ ЗАПОМИНАНИЯ ФОРМЫ

Инж. ШМАТОК Е. В., канд. физ.-мат. наук, доц. ОСТРИКОВ О. М.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

В настоящее время математическое моделирование особенностей напряженно-деформированного состояния является перспективным направлением научных исследований. В связи с этим целью данной работы стал расчет напряженно-деформированного состояния, обусловленного системой параллельных линзовидных остаточных механических двойников, возникающих при локальном деформировании поверхности мартенситной фазы монокристалла Ni_2MnGa . Метод применяется с использованием принципа суперпозиции полей и в приближении непрерывного распределения двойникообразующих дислокаций на границах двойника в сплошной упругой среде.

Получены графики распределения полей смещений и напряжений, на основании которых замечено, что конфигурация распределения компоненты смещений u_y значительно отличается от смещений компонент u_x и u_z , имеющих подобное друг другу распределение смещений. Наибольшая величина смещений наблюдается у компоненты u_y в области вершин двойников.

Представлены результаты расчетов шести компонент тензора полей напряжений. Отмечено подобие характера распределения напряжений компонент σ_{xz} и σ_{yz} , однако численно компоненты отличны друг от друга примерно в два раза. Наибольшая величина возникающих напряжений в системе линзовидных двойников наблюдается у компонент σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{yy} , σ_{yz} и сосредоточена главным образом у границ и вершин двойников. Общей чертой полученных компонент смещений и напряжений системы линзовидных двойников является симметричность относительно ОУ. Помимо этого, распределение напряжений у всех полученных компонент тензора главным образом локализовано на границах

и у вершин двойников, где, как правило, сосредоточены наибольшие значения напряжений, способных оказывать существенное влияние на дислокационные и диффузионные процессы.

Ключевые слова: сплавы Гейслера, параллельные линзовидные остаточные механические двойники, локальное деформирование, поверхность мартенситной фазы монокристалла, принцип суперпозиции полей, двойнирующие дислокации, поля напряжений.

Ил. 4. Библиогр.: 13 назв.

METHOD FOR CALCULATION OF DISPLACEMENT FIELDS AND STRESSES IN SYSTEM OF PARALLEL LENTICULAR MECHANICAL TWINS OCCURRING IN MARTENSITIC PHASE OF Ni_2MnGa -MAGNETIC ALLOY HAVING PROPERTY OF SHAPE MEMORY

SHMATOK E. V., OSTRIKOV O. M.

P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel

Nowadays mathematical modeling of peculiar features of a stress-strain state is considered as a perspective direction of research. In this regard the aim of this paper has been to make calculations of the stress-strain state initiated by a system of parallel lenticular residual mechanical twins that occur due to local surface deformation of Ni_2MnGa single crystal martensitic phase. The method is applied while using a superposition principle of fields and approximation of a continuous distribution of twinning dislocations on twin boundaries in a continuous elastic medium.

The calculations have made it possible to obtain distribution graphs of displacement fields and stresses and point out the fact that a configuration of displacement component distribution u_y is significantly different from the displacement of components u_x and u_z having a displacement distribution similar to each other. The highest value of displacement occurs in the component u_y in twins peaks.

The paper also presents results of calculations for six components of a stress field the tensor. The obtained results have revealed similarity in stress distribution character of the components σ_{xz} and σ_{zz} , but they differ numerically from each other about in two times. The largest value of the stresses occurring in the lenticular twins has been observed in components σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{yy} , σ_{yz} and it has been focused mainly at the borders and peaks of twins. A common feature of the obtained components of displacement and stresses in a lenticular twins system is symmetry with regard to OY . In addition, the stress distribution of all obtained tensor components has been mainly localized at the borders and at the tops of twins where the highest values of stresses capable of exerting a significant impact on dislocation and diffusion processes are generally concentrated.

Keywords: Heusler alloy, parallel lenticular residual mechanical twins, local deformation, surface of single crystal martensitic phase, superposition principle of fields, twinning dislocation, stress field.

Fig. 4. Ref.: 13 titles.

Введение. Сплавы Гейслера, или магнитные материалы с памятью формы, приобретают все большую популярность как в практическом, так и в фундаментальном направлении исследований [1–5]. Открытый эффект бездиффузионного фазового превращения в магнитном поле у сплавов Гейслера породил целую волну разнообразных полезных изобретений и механизмов. Самый яркий пример этого – актюатор, в котором способности сплава Ni_2MnGa нашли практическое применение одними из первых [5]. В плане практического применения металлы с памятью формы обладают как достоинствами, так и недостатками. Знание этих качеств позволяет находить наилучшие способы массового и единичного применения, оптимизировать условия эксплуатации и улучшать рабочие характеристики материала.

Экспериментальные исследования двойникования и бездиффузионного фазового превращения в настоящее время проведены на достаточно высоком уровне [6–9]. При этом были установлены базовые принципы поведения мартенситной фазы в магнитных полях с изменяющимися параметрами. Определены общие свойства для всех мартенситных фаз сплава Ni_2MnGa . Показано, что процесс бездиффузионного фазового превращения зависит от направления степени намагниченности мартенситной фазы. При непрерывном вращении магнитного поля в сплаве возникает сильная магнитомеханическая связь, результатом которой становятся магнитоиндуцированные напряжения.

Механическое двойникование мартенситной фазы монокристаллического Ni_2MnGa исследу-

довалось в [9], где для этих целей использовался хорошо зарекомендовавший себя при определении механического двойникования метод локального дозированного деформирования поверхности [10]. Перспективным направлением исследований представляется математическое моделирование особенностей напряженно-деформированного состояния, обусловленного механическим двойникованием Ni_2MnGa .

Целью данной работы стало моделирование напряженно-деформированного состояния в сплаве Ni_2MnGa , обусловленного системой параллельных линзовидных двойников, возникающих в Ni_2MnGa при индентировании его поверхности алмазной пирамидой Виккерса.

Для достижения этой цели, как в [10–12], целесообразно использовать принцип суперпозиции смещений и компонент тензора напряжений, создаваемых совокупностью дислокаций, выстроенных по определенному закону на двойниковых границах.

Модель. Типичная деформационная картина, возникающая на поверхности (100) мартенситной фазы Ni_2MnGa у отпечатка пирамиды Виккерса, представлена на рис. 1.

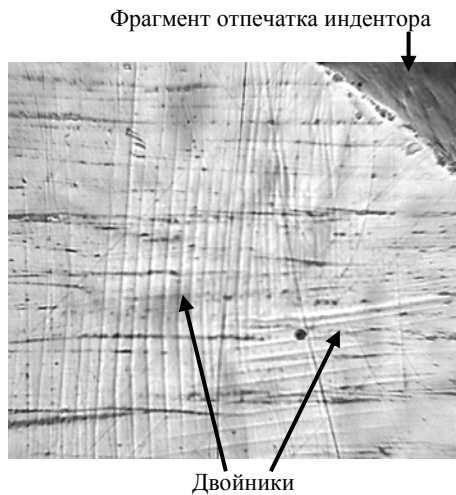


Рис. 1. Деформационная картина, возникающая на поверхности (100) монокристалла Ni_2MnGa , деформируемой алмазной пирамидой Виккерса (оптическая микроскопия $\times 150$)

Главной особенностью этой картины является наличие групп параллельных двойников линзовидной формы, которые, как правило, возникают вдали от отпечатка индентора [9]. Схематическое изображение системы параллельных линзовидных двойников, использо-

ванное в расчетной модели, представлено на рис. 2.

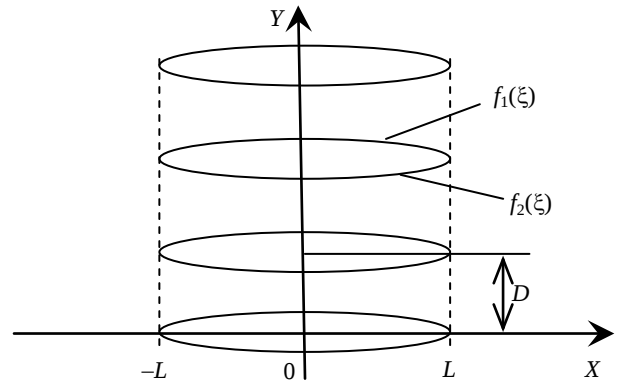


Рис. 2. Система параллельных линзовидных двойников

В приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, использованного в [10–12], смещения u_i и напряжения σ_{ij} у такой системы двойников можно рассчитать:

$$u_i(x, y) = u_i^{(1)}(x, y) + u_i^{(2)}(x, y);$$

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sigma_{ij}^{(1)}(x, y) + \sigma_{ij}^{(2)}(x, y),$$

где i, j принимают значения x, y или z ; $u_i^{(1)}(x, y)$, $u_i^{(2)}(x, y)$ и $\sigma_{ij}^{(1)}(x, y)$, $\sigma_{ij}^{(2)}(x, y)$ – смещения и напряжения, обусловленные первой и второй границами двойника, которые в соответствии с [10] определяются по формулам:

$$u_i^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) u_i^{(1,0)} \times \\ \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$u_i^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) u_i^{(2,0)} \times \\ \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{ij}^{(1,0)} \times \\ \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{ij}^{(2,0)} \times \\ \times (x, y - nD, \xi) d\xi.$$

Здесь M – число двойников в системе параллельных двойников; $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ – функции, определяющие форму двойниковых границ (рис. 2); $\rho_1(\xi)$ и $\rho_2(\xi)$ – плотности двойни-
кующих дислокаций на двойниковых границах; ξ – параметр интегрирования; n – индекс сум-

мирования; $u_i^{(1,0)}(x, y - nD, \xi)$, $u_i^{(2,0)}(x, y - nD, \xi)$ и $\sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi)$, $\sigma_{ij}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi)$ – смещения и напряжения, обусловленные единичной двойни-
кующей дислокацией, находящейся на первой или второй границе двойника, и определяемые по формулам [10]:

$$u_x^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{x - \xi} + \frac{(x - \xi)(y - f_1(\xi) - nD)}{2(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_y^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\frac{1 - 2\nu}{2\pi} \ln((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2) + \frac{(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2}{4(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_z^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_b}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{x - \xi};$$

$$\sigma_{xx}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(y - f_1(\xi) - nD)[3(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{yy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(y - f_1(\xi) - nD)[(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{xy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(x - \xi)[(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{zz}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{kp} \nu}{\pi(1 - \nu)} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zx}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_b}{2\pi} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_b}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$u_x^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{x - \xi} + \frac{(x - \xi)(y - f_2(\xi) - nD)}{2(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_y^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\frac{1 - 2\nu}{2\pi} \ln((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2) + \frac{(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2}{4(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_z^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_b}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{x - \xi};$$

$$\sigma_{xx}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(\xi) - nD)[3(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{yy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(\xi) - nD)[(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{xy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x - \xi)[(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{zz}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{\text{кр}} \nu}{\pi(1-\nu)} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zx}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2};$$

где μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; $b_{\text{кр}}$, $b_{\text{в}}$ – модули соответственно краевой и винтовой составляющих частичной двойнивающей дислокации.

Результаты расчетов и их обсуждение.

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4. Для Ni_2MnGa принимались следующие данные:

$L = 60$ мкм; $H = 20$ мкм; $D = 45$ мкм; $M = 5$; $\rho_1(\xi) = \rho_2(\xi) = \text{const} = \rho = 10^6$; $\nu = 0,3$; $\mu = 19,231$ ГПа; $b_{\text{кр}} = 2,91 \cdot 10^{-9}$ А; $b_{\text{в}} = 2,74 \cdot 10^{-9}$ А [1–6].

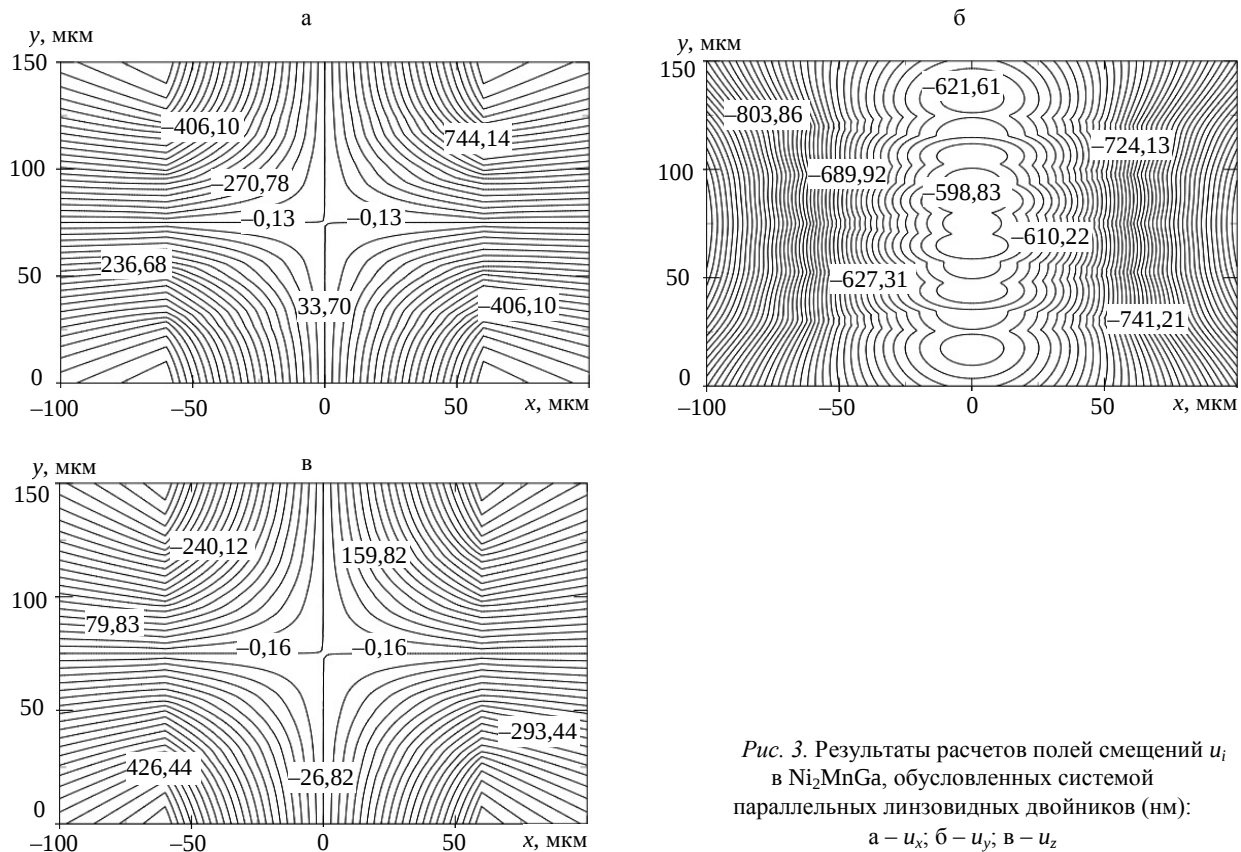


Рис. 3. Результаты расчетов полей смещений u_i в Ni_2MnGa , обусловленных системой параллельных линзовидных двойников (нм): а – u_x ; б – u_y ; в – u_z

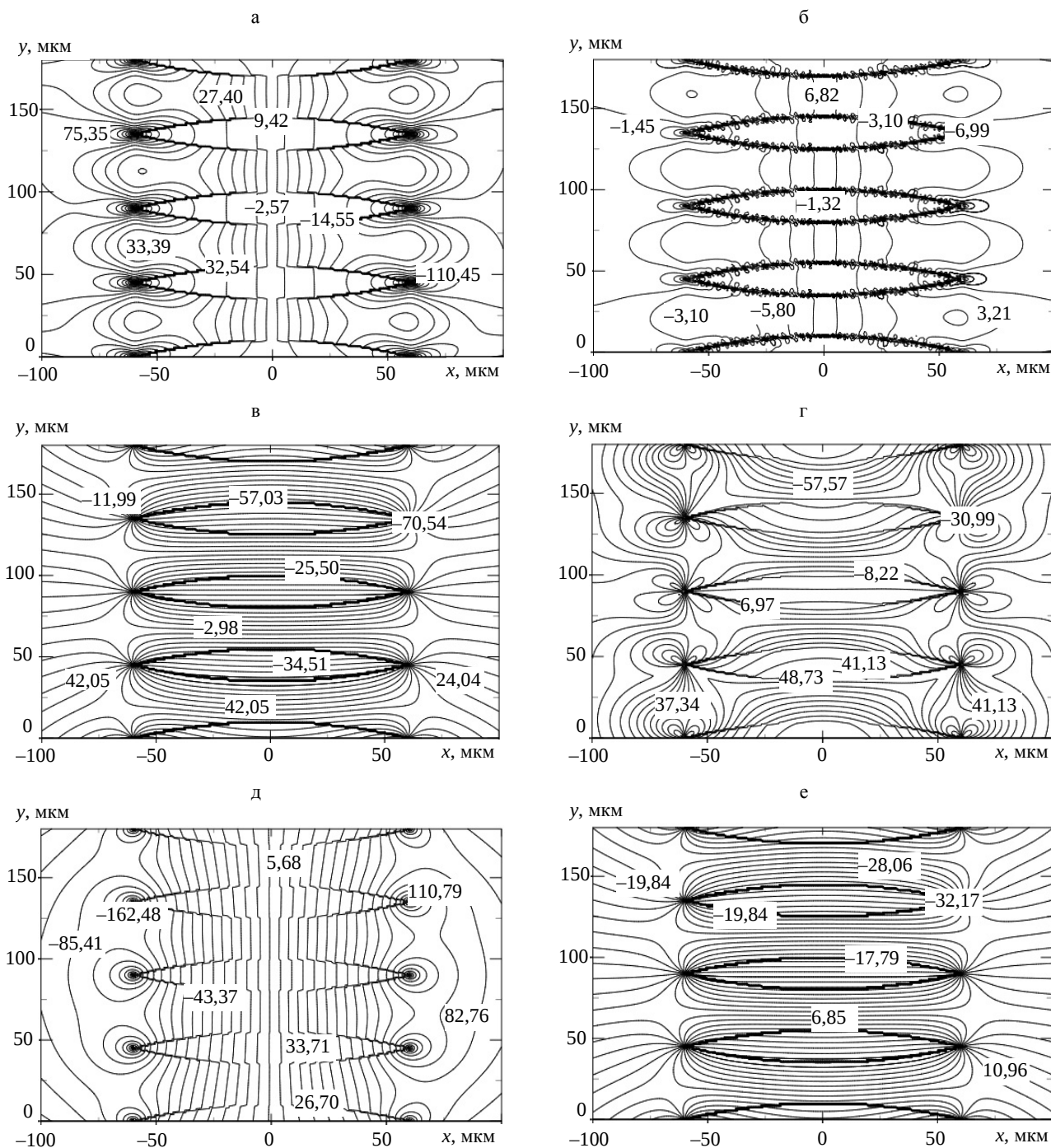


Рис. 4. Поля напряжений σ_{ij} в Ni_2MnGa , созданные параллельными линзовидными двойниками (МПа):

а – σ_{xx} ; б – σ_{xy} ; в – σ_{xz} ; г – σ_{yy} ; д – σ_{yz} ; е – σ_{zz}

Расчет смещений u_i представлен на рис. 3. Конфигурация линий равных величин смещений для u_x и u_z идентична (рис. 3а, в). Отличие заключается в величине численных значений смещений в заданной точке. Данные смещения симметричны относительно начала декартовой системы координат.

Конфигурация полей смещений u_y (рис. 3б) существенно отличается от конфигурации смещений u_x и u_z . Наибольшие смещения u_y наблюдаются в области вершин двойников.

На рис. 4а представлен результат расчета нормальной компоненты тензора напряжений σ_{xx} . Максимальные по модулю значения

напряжений σ_{xx} наблюдаются у вершин двойников. Это обусловлено особенностями конфигурации напряжений у единичной двойнивающей дислокации. На верхней и нижней границах двойников значения напряжений значительно ниже, чем у вершин. Метод позволяет рассчитывать напряжения и внутри двойника, где σ_{xx} имеет распределение, симметричное осям OX и OY . На рис. 4а также можно наблюдать порядок значений напряжений в пространстве между двойниками. Уровень напряжений в окружающем двойник материале возрастает по мере продвижения вдоль оси OX к началу координат.

На рис. 4б изображен графический результат расчета сдвиговой компоненты тензора напряжений σ_{xy} . В данном случае наблюдается несколько иная картина. Общий уровень напряжений вначале возрастает по мере удаления вдоль оси OX от начала координат, а затем монотонно убывает.

Результат расчета сдвиговой компоненты σ_{xz} представлен на рис. 4в. В данном случае линии равных напряжений из бесконечности сходятся к вершинам двойников. У верхних и нижних границ двойников видна существенная разница по модулю значений напряжений. Напряжения у верхних границ приблизительно на порядок выше напряжений у нижних границ линзовидных двойников. Более того, напряжения возрастают по мере продвижения вдоль оси OY от крайних двойников к двойникам, находящимся в центре системы параллельных двойников.

На рис. 4г представлен результат расчета нормальной компоненты тензора напряжений σ_{yy} . Как видно, напряжения σ_{yy} на оси OY по модулю минимальны в центральной части системы параллельных линзовидных двойников, а максимальны у крайних двойников.

Расчет сдвиговой компоненты σ_{yz} тензора напряжений показан на рис. 4д. Конфигурация данных напряжений обладает симметрией относительно оси OY . Вдоль оси OX данные напряжения по модулю возрастают при

перемещении от центра единичного двойника в системе параллельных двойников к его вершинам.

Результат расчета нормальной компоненты σ_{zz} тензора напряжений, созданных рассматриваемой системой двойников, отображает рис. 4е. Конфигурация данных напряжений обладает схожестью с результатом, представленным на рис. 4е в случае компоненты σ_{xz} . Отличие заключается лишь в численных значениях.

Общей особенностью для распределения всех компонент тензора напряжений (рис. 4) является локализация напряжений на границах и у вершин двойников. В этих областях уровень напряжений, как правило, имеет наибольшее значение, что указывает на существенную роль двойниковых границ в дислокационных и диффузионных процессах, обусловленных внутренними напряжениями. При этом толщина двойниковых границ соизмерима с межатомным расстоянием [13].

ВЫВОД

На основании принципа суперпозиции разработан метод расчета смещений и напряжений в системе параллельных линзовидных остаточных механических двойников. Метод применен для расчета напряжений в мартенситной фазе Ni_2MnGa , в которой присутствует такая система двойников. Определены области локализации напряжений и изучена конфигурация полей смещений и напряжений в системе параллельных двойников, возникающих в монокристалле Ni_2MnGa при его локальном деформировании*.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Giant** Magnetic-Field-Induced Strain in $NiMnGa$ Seven-Layered Martensitic Phase / A. Sozinov [et al.] // *Applied Physics Lett.* – 2002. – Vol. 80, No 10. – P. 1746–1748.
2. **Heczko, O.** Temperature Dependence and Temperature Limits of Magnetic Shape Memory Effect / O. Heczko, L. Straka // *Journal of Applied Physics.* – 2003. – Vol. 94, No 11. – P. 7139–7143.
3. **Heczko, O.** Magnetic Properties and Domain Structure of Magnetic Shape Memory $Ni-Mn-Ga$ Alloy / O. Heczko, K. Jurek, K. Ullakko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2001. – Vol. 226–230. – P. 996–998.

* Авторы благодарят научного руководителя AdaptaMat Ltd. (Финляндия, Хельсинки) А. Л. Созину за любезно предоставленные образцы Ni_2MnGa .

4. **Large** Cyclic Deformation of a Ni–Mn–Ga Shape Memory Alloy Induced by Magnetic Fields / P. Mullner [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 92, No 11. – P. 6708–6713.

5. **Aaltio, I.** Magnetic Shape Memory Actuators / I. Aaltio, K. Ullakko // *Proc. of 7th International Conference on New Actuators*, 19–21 June 2000, Bremen, Germany. – Bremen, 2000. – P. 527–530.

6. **Hirsinger, L.** Modelling Detwinning of Martensite Platelets Under Magnetic and Stress Actions on Ni–Mn–Ga Alloys / L. Hirsinger, C. Lexcelent // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – Vol. 254–255. – P. 275–277.

7. **Mullner, P.** Large Cyclic Magnetic-Field-Induced Deformation in Orthorhombic (14M) Ni–Mn–Ga Martensite / P. Mullner, V. A. Chernenko, G. Kosterz // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – Vol. 95, No 3. – P. 1531–1536.

8. **Mullner, P.** Stress-Induced Twin Rearrangement Resulting In Change of Magnetization in a Ni–Mn–Ga Ferromagnetic Martensite / P. Mullner, V. A. Chernenko, G. Kosterz // *Scripta Materialia*. – 2003. – Vol. 49, No 2. – P. 129–133.

9. **Остриков, О. М.** Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni₂MnGa методом индентирования / О. М. Остриков, А. Л. Созинов, А. В. Сорока // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.

10. **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел / О. М. Остриков. – Гомель: Гомельский гос. техн. ун-т имени П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

11. **Остриков, О. М.** Напряженное состояние у поверхности кристалла, деформируемой сосредоточенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника / О. М. Остриков // *Журнал технической физики*. – 2009. – Т. 79, № 5. – С. 137–139.

12. **Остриков, О. М.** Метод расчета распределения деформаций у клиновидного двойника с использованием подходов макроскопической дислокационной модели / О. М. Остриков // *Известия РАН. Механика твердого тела*. – 2009. – № 4. – С. 52–58.

13. **Шепелевич, В. Г.** Структурно-фазовые превращения в металлах / В. Г. Шепелевич. – Минск: БГУ, 2007. – 167 с.

REFERENCES

1. **Sozinov, A., Likhachev, B. A., Lanska, N., & Ullakko, K.** (2002) Giant Magnetic-Field-Induced Strain in NiMnGa Seven-Layered Martensitic Phase. *Applied Physics Lett.*, 80 (10), 1746–1748. Doi: 10.1063/1.1458075.

2. **Heczko, O., & Straka, L.** (2003) Temperature Dependence and Temperature Limits of Magnetic Shape Memo-

ry Effect. *Journal of Applied Physics*, 94 (11), 7139–7143. Doi: 10.1063/1.1626800.

3. **Heczko, O., Jurek, K., & Ullakko, K.** (2001) Magnetic Properties and Domain Structure of Magnetic Shape Memory Ni–Mn–Ga alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 226–230, 996–998. Doi: 10.1016/S0304-8853(00)01170-7.

4. **Mullner, P., Chernenko, V. A., Wollgarten, M., & Kosterz, G.** (2002) Large Cyclic Deformation of a Ni–Mn–Ga Shape Memory Alloy Induced by Magnetic Fields. *Journal of Applied Physics*, 92 (11), 6708–6713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1513875>.

5. **Aaltio, I., & Ullakko, K.** (2000) Magnetic Shape Memory Actuators. *Proc. of 7th International Conference on New Actuators*, 19–21 June 2000, Bremen, Germany, 527–530.

6. **Hirsinger, L., & Lexcelent, C.** (2003) Modelling Detwinning of Martensite Platelets Under Magnetic and Stress Actions on Ni–Mn–Ga Alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254–255, 275–277. Doi: 10.1016/S0304-8853(02)00773-4.

7. **Mullner, P., Chernenko, V. A., & Kosterz, G.** (2004) Large Cyclic Magnetic-Field-Induced Deformation in Orthorhombic (14M) Ni–Mn–Ga Martensite. *Journal of Applied Physics*, 95 (3), 1531–1536. Doi: 10.1063/1.1639144.

8. **Mullner, P., Chernenko, V. A., & Kosterz, G.** (2003) Stress-Induced Twin Rearrangement Resulting in Change of Magnetization in a Ni–Mn–Ga Ferromagnetic Martensite. *Scripta Materialia*, 49 (2), 129–133. Doi: 10.1016/S1359-6462(03)00219-7.

9. **Ostrikov, O. M., Sozinov, A. L., & Soroka, A. V.** (2012) Investigations of Plastic Deformation on Ni₂MnGa Single Crystal Surface Using Indentation Method. *Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal* [Engineering and Physical Journal], 85 (5), 1132–1141 (in Russian).

10. **Ostrikov, O. M.** (2008) *Mechanics in Twinning of Solid Bodies*. Gomel: P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. 301 p. (in Russian).

11. **Ostrikov, O. M.** (2009) Stressed State at Crystal Surface Deformed by Concentrated Load with V-Type Twin. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* [Journal of Applied Physics], 79 (5), 137–139 (in Russian).

12. **Ostrikov, O. M.** (2009) Method for Calculation of Deformation Distribution in V-Type Twin While Using Approaches of Macroscopic Dislocation Model. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mehanika Tverdogo Tela* [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids], 4, 52–58 (in Russian).

13. **Schepelevich, V. G.** (2007) *Structural and Phase Transformations in Metals*. Minsk: Belarusian State University. 167 p. (in Russian).

Поступила 18.02.2013

УДК 681.723.078, 681.775.078, 681.777.078

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА КОЛЛИМАТОРА В СХЕМАХ КОНТРОЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Инж. СТАРОСОТНИКОВ Н. О., канд. техн. наук ФЁДОРЦЕВ Р. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: starasotnikau@gmail.com

В статье рассматривается схема контроля при помощи коллиматора таких оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками, как автоколлиматоры, микроскопы, звездные датчики, различная съемочная аппаратура. На точность контроля оказывает влияние ряд факторов (дискретность структуры, шумы фотоприемника, согласованность размера тест-объекта коллиматора, размера пикселя фотоприемника и функции рассеяния точки оптических компонентов). Применительно к задачам контроля и юстировки оптико-электронных приборов рассмотрена схема, включающая два компонента: контролирующий (коллиматор) и контролируемый (телецентрическая система). Для определения влияния перечисленных факторов предложена математическая модель схемы контроля и описан вариант ее численной реализации.

В результате моделирования подобрано оптимальное соотношение между параметрами компонентов оптической схемы контроля: функции рассеяния точки объектива коллиматора и телецентрической системы, размером тест-объекта коллиматора, размером пикселя фотоприемника. Определен размер тест-объекта коллиматора, который в рассматриваемой схеме будет давать меньшую погрешность измерений, вызванную дискретностью фотоприемника контролируемого прибора, а также среднеквадратическое отклонение определения энергетического центра тяжести тест-объекта, вызванное шумами фотоприемника. Для уменьшения влияния шумов предложено принять за нулевые значения сигнала, меньшие, чем удвоенный шаг дискретизации аналого-цифрового преобразователя.

Ключевые слова: коллиматор, оптико-электронный прибор, тест-объект, фотоприемник.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

ESTIMATION OF ACCURATE DETERMINATION FOR COORDINATES OF GRAVITY ENERGY CENTER IN COLLIMATOR TEST-OBJECT IN RESPECT OF CONTROL SCHEMES FOR OPTOELECTRONIC DEVICES WITH MATRIX PHOTODETECTORS

STARASOTNIKAU M. A., FEODORTSAU R. V.

Belarusian National Technical University

The paper considers a control scheme of such optoelectronic devices with matrix photo-detectors as autocollimators, microscopes, star trackers and other film equipment and the control is carried out with the help of a collimator. A number of factors (structure discreteness, photo-detector noise, consistency in collimator test-object size, photo-detector pixel size and point scattering function of optical components) exert an influence on control accuracy. In the context of control problems and alignment of optoelectronic devices the paper studies a scheme which includes two components: controlling component that is a collimator and a component to be controlled that is a tele-centric system). A mathematical model for control schemes has been proposed with the purpose to determine an effect of the above-mentioned factors and its mathematical implementation has been described in the paper.

Due to simulation an optimal ratio has been selected for component parameters of the optical control scheme: point scattering function for a collimator objective and a telecentric system, collimator test-object size, photo-detector pixel size. A collimator test-object size has been determined in the paper. Using the considered scheme the size will give the smallest measurement error caused by photo-detector discreteness of a controlled device. A standard deviation of the gravity energy center for a collimator test-object caused by photo-detector noise has been determined in the paper. In order to reduce the effect of photo-detector noise the paper proposes to take as zero values of a signal such values which are smaller than a doubled discretization interval of an analog-to-digital converter.

Keywords: collimator, optoelectronic device, test-object, photo-detector.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. В контрольно-измерительных оптических приборах основным критерием качества является точность. В большинстве оптических приборов, таких как автоколлиматоры, микроскопы, звездные датчики, различная съемочная аппаратура и другие, используются матричные фотоприемники (ФП) оптического сигнала. Точность измерения в данных приборах зависит от точности определения координат энергетических центров тяжести изображений на ФП. Координаты энергетического центра изображения на ФП вычисляются с субпиксельной точностью. На точность их определения влияют многие факторы, в том числе дискретность структуры ФП, из-за которой возникает систематическая погрешность при определении энергетического центра тяжести изображения, форма и размер изображения, а также шумы, в частности дробовый.

Описание моделируемой оптической схемы контроля. Рассмотрим часто встречающуюся схему в задачах контроля и юстировки оптико-электронных приборов [1, 2]. Оптическая схема контроля состоит из двух компонентов: контролирующего (часто в данном качестве выступает коллиматор) и контролируемого (например, телецентрическая система, по которой строится значительное количество оптико-электронных приборов и состоящая из изображающей оптической системы (объектив), ФП, расположенного в задней фокальной плоскости объектива, и устройства обработки сигнала) (рис. 1). В оптико-электронных приборах ФП является устройством, которое формирует информационный сигнал и в то же время является измерительной шкалой, служащей для определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта (ТО).

Для достижения наилучшей точности необходимо согласовать компоненты оптической схемы контроля, т. е. должен быть согласован размер ТО, функция рассеяния точки (ФРТ) объектива и размер пикселя ФП. Для динамических систем, чтобы устранить искажения (муар в изображении), обусловленные дискретизацией, размер пикселя ФП должен быть минимум в два раза меньше размера ФРТ объектива. В этом случае разрешение системы «объектив – ФП» будет в два раза меньше значения разрешения, соответствующего равенству ФРТ и размера пикселя.

Для упрощения расчетов объектив контролирующего коллиматора выбран таким же, как и объектив телецентрической системы. В качестве ФП в модели используются параметры панхроматической ПЗС-матрицы Kodak KAI-2020 [3].

Вышеперечисленные соотношения сведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение параметров компонентов оптической схемы контроля

Диаметр ТО (оптимальный)	ФРТ объектива коллиматора, диаметр на полувысоте	ФРТ объектива телецентрической системы, диаметр на полувысоте	Размер пикселя ФП, квадрат со стороной
37,5 мкм	15 мкм	15 мкм	7,4 мкм (7,5 мкм)
5 пикс	2 пикс	2 пикс	1 пикс

Целью моделирования явилось определение размера ТО, который в рассматриваемой оптической схеме контроля будет вызывать меньшую погрешность измерений, вызванную дискретностью ФП контролируемого прибора, а также оценить влияние шумов ФП на погрешность измерений.

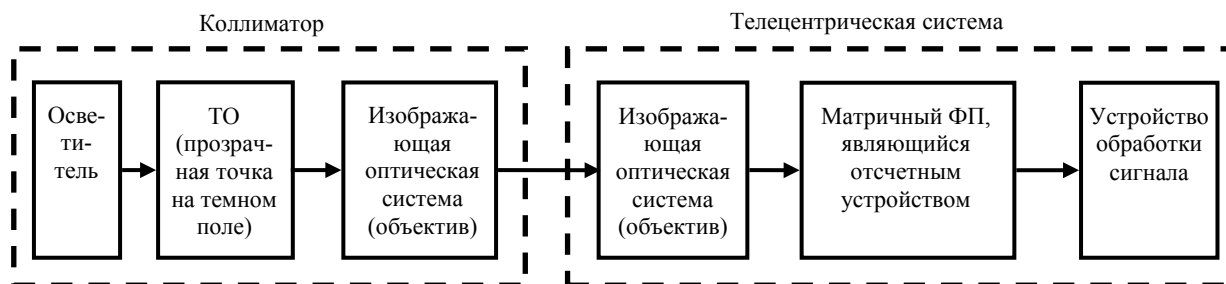


Рис. 1. Структурная моделируемая оптическая схема контроля

Fig. 1. Block diagram of the simulated optical system

Математическая реализация моделируемой оптической схемы контроля. Для исследования свойств и величины погрешности была построена математическая модель изображения ТО на ФП в среде MathCad.

В модели использовались следующие параметры объектива: фокусное расстояние $f' = 150$ мм, диаметр выходного зрачка $D' = 150$ мм, линейное увеличение $\beta^* = -1$. Рисунок ТО описывается функцией $T(r)$, где $r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$. Шаг дискретизации (рис. 2), используемый в математической модели, составляет $dx, dy = 2,5$ мкм ($\sim 1/3$ пикс), меньший шаг дискретизации не приводит к существенному увеличению точности расчета, при этом значительно увеличивая его продолжительность. Если пренебречь аберрациями объектива, то математически передаточная функция объектива выражается ФРТ объектива, которая описывается функцией Бесселя 1-го рода 1-го порядка J_1 [4, 5]:

$$B(r) = \left(\frac{2J_1(m(r))}{m(r)} \right)^2,$$

где $m(r) = 2\pi / (\lambda NA' r)$, $r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$, $NA' = 0,05$ – числовая апертура объектива в пространстве изображений; $\lambda = 590$ нм – основная длина волны.

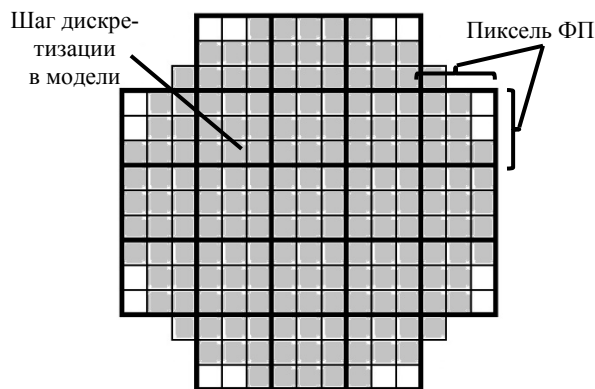


Рис. 2. Соотношение между размером ТО (серая область) и размером пикселя ФП для круглого ТО размером 5 пикс

Fig. 2. The relationship between a size of a test-object (gray area) and a size of a photodetector pixel for a round test-object with size 5 pixels

Для получения распределения энергии изображения ТО $E1(r)$, находящегося в беско-

нечности, т. е. после коллиматора, необходимо произвести свертку функций изображения ТО и ФРТ объектива

$$E1(r) = B(r)T(r).$$

Распределение энергии изображения ТО на ПЗС-матрице $E2(r)$, т. е. после прохождения второго объектива, определяется повторной сверткой

$$E2(r) = B(r)E1(r).$$

Координаты центра тяжести изображения ТО на ПЗС-матрице Cx, Cy в долях пикселя определяются как [6]:

$$Cx = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}; \quad Cy = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}},$$

где $I_{n,m}$ – величина сигнала в пикселе n, m ; N, M – число столбцов и строк матрицы яркостей; n, m – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы.

С помощью формул для определения координат центра тяжести производится непосредственно оценка координат изображения ТО, а также осуществляется интерполяция результатов измерений дискретной матричной ФП-структурой на внутренние точки интервалов дискретизации. С помощью этих формул можно также оценить координаты изображения ТО с погрешностью, меньшей, чем интервал дискретизации ФП, т. е. на субпиксельном уровне. Погрешность определения по этим формулам имеет две составляющие: интерполяционную и флуктуационную (шумовую) [7].

Интерполяционная погрешность определения зависит от положения центра изображения ТО относительно центра пикселя, представляет собой отклонение математического ожидания оценки от истинного значения координаты и является систематической при заданных форме распределения и шаге дискретности матричной структуры ФП. Погрешность интерполяции тем меньше, чем меньше шаг дискретности ФП. Но при уменьшении шага дискретности квадратично возрастает число элементов и соответственно загрузка вычислительных средств, выполняющих оценку.

Флуктуационная (шумовая) погрешность определения порождается в основном дробовым шумом наблюдаемого поля и характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО) оценки от его среднего значения [7]. Снизить данную погрешность можно путем уменьшения размера ТО при сохранении общей энергии сигнала в изображении ТО. Это приводит к увеличению резкости края изображения ТО. Если размер ТО становится сопоставимым по размерам с пикселем, то большинство энергии сигнала концентрируется на одном пикселе, что приводит к увеличению погрешности. Другим способом уменьшения погрешности является уменьшение размера пикселя при сохранении размера ТО [7].

Подбор оптимального соотношения между размером ТО и размером элемента ФП. Чтобы определить величину интерполяционной погрешности, производилось смещение изображения ТО относительно пикселей ФП. Аналогично [8], погрешность имеет периодический характер с периодом 1 пикс, т. е. при смещении изображения ТО на величины 0,25 и 0,75 пикс относительно первоначального положения погрешность будет максимальной, а при смещении на 0,5 либо 1,0 пикс относительно первоначального положения погрешность равняется нулю.

Для определения оптимального размера круглого ТО смоделированы ТО с различными размерами рисунков. По результатам моделирования определена интерполяционная погрешность для круглых ТО с различными размерами (рис. 3). Значения интерполяционной погрешности приведены для ТО размером до 20 пикс, дальнейшее увеличение размера ТО не приводит к существенному изменению интерполяционной погрешности.

Из анализа полученных результатов видно, что к наименьшей интерполяционной погрешности приводят ТО диаметрами 5, 13, 15 пикс, наибольшая получена для ТО диаметрами 1–4, 6, 7, 9–11 пикс. Для ТО диаметром 5 пикс интерполяционная погрешность составляет 0,000018 пикс, для 13 ее величина равна 0,000029 пикс, для 15 – 0,00004 пикс. ТО диаметром 12 пикс и более не дают значительной погрешности. Поскольку ТО размером 5 пикс приводит к наименьшей величине интерполяционной погрешности, то ТО с таким размером используется в дальнейших расчетах.

СКО определения центра тяжести ТО, вызванное шумами ФП. Для ПЗС-матриц видимого диапазона существенными шумами, влияющими на точность регистрации полезного сигнала, являются (по возрастанию): дробовый шум темнового сигнала, шум считывания, фотонный дробовый шум. Дробовый шум подчиняется распределению Пуассона, в соответствии с которым дисперсия $\sigma_{др}^2$ количества носителей заряда (электронов) равна среднему значению числа носителей заряда. Носители заряда в ФП могут быть генерированы и в отсутствие внешней засветки. Поэтому различают две составляющие дробового шума: шум, создаваемый фотогенерированными зарядами (фотонный), и шум темнового сигнала $n_{темн}$, определяемый [9]:

$$n_{темн} = it,$$

где $i = 40 \text{ э/с}$ – темновой ток; $t = 0,237 \text{ с}$ – время накопления заряда для ПЗС-матрицы Kodak KAI-2020 [3].

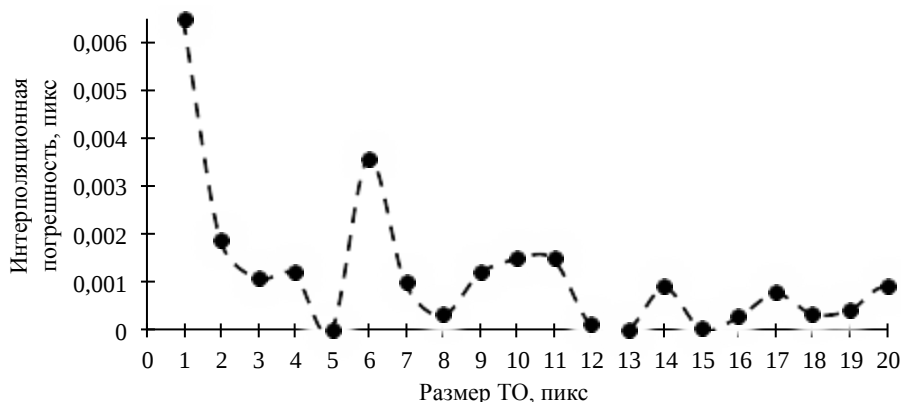


Рис. 3. Интерполяционная погрешность для круглого ТО с различными размерами

Fig. 3. The interpolation error for a round test-object with different sizes

Тогда дисперсия дробового шума $\sigma_{\text{др}}^2(r)$, являющаяся параметром распределения Пуассона, определяется значением распределения энергии изображения ТО на ПЗС-матрице $E2(r)$ и темновым сигналом $n_{\text{темн}}$:

$$\sigma_{\text{др}}^2(r) = E2(r) + n_{\text{темн}}.$$

С учетом данного параметра сформируем распределение энергии на ФП с дробовым шумом $E3(r)$. Для ФП матрицы Kodak KAI-2020 при максимальной частоте считывания данных 20 МГц СКО шума считывания, имеющего распределение Гаусса, составляет $\sigma_{\text{сч}} = 16$ э⁻ и определяется конструкцией ФП.

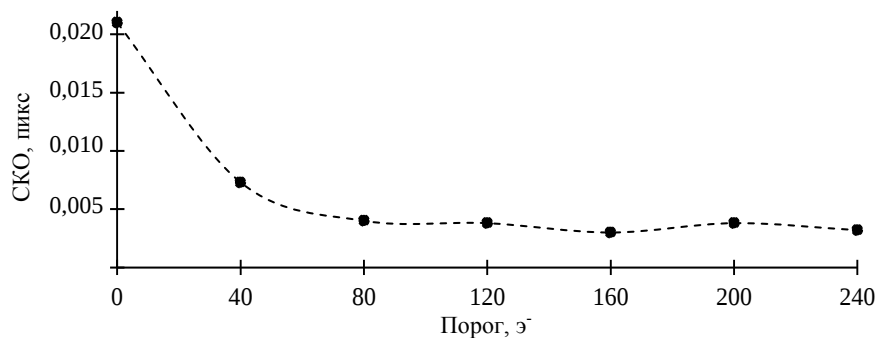


Рис. 4. СКО определения координат энергетического центра тяжести ТО для различных значений порога шумов

Fig. 4. MSE of test-object energy center of gravity coordinates determine for different values of a noise threshold

Тогда сформируем распределение энергии $E_{\text{сч}}(r)$, вызванной шумом считывания. Таким образом, распределение энергии изображения ТО на ФП $E4(r)$ с учетом шумов будет определяться суммой

$$E4(r) = E3(r) + E_{\text{сч}}(r).$$

Распределение энергии изображения ТО на ФП $E4(r)$ является аналоговым. Далее произведем оцифровку распределения $E4(r)$. С учетом предельной величины входного заряда ПЗС-матрицы KAI-2020 [3] для 10-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) шаг дискретизации составит ~ 40 э⁻.

Проводили численный расчет распределения энергии изображения ТО на ФП с учетом дискретизации. Наличие неравномерной по пространству шумовой составляющей приводит к дополнительной погрешности. По результатам моделирования установлено, что СКО определения координат энергетического центра

тяжести ТО, вызванное шумами ФП, составило 0,021 пикс для выборки 100.

Одним из методов уменьшения влияния шумов является введение величины порога шумов, значения ниже которого принимаются нулевыми [10]. По результатам моделирования определена зависимость между СКО определения координат энергетического центра тяжести ТО, вызванное шумами ФП и порога шумов (рис. 4). Значения порога брали с шагом дискретизации АЦП, равным ~ 40 э⁻. СКО определяли для выборки 100. Значительное улучшение наблюдается для порога в ~ 40 э⁻. Увеличение порога более ~ 80 э⁻ не приводит к ощутимым улучшениям.

ВЫВОДЫ

1. Исследовались факторы, влияющие на точность определения энергетического центра тяжести ТО в оптико-электронных приборах. Можно выделить: интерполяционную погрешность, представляющую собой отклонение математического ожидания оценки от истинного значения координаты, являющуюся систематической при заданных форме распределения и шаге дискретности ФП, зависит от положения центра изображения ТО относительно центра пикселя; флуктуационную (шумовую) погрешность, порождаемую в основном дробовым шумом наблюдаемого поля и характеризующуюся СКО оценки от его среднего значения. Для определения этих погрешностей создана математическая модель контроля телецентрической системы коллиматором.

2. Подобрано оптимальное соотношение между размером ТО и размером пикселя ФП. Наименьшую погрешность вызывают ТО диаметрами 5, 13, 15 пикс. ТО диаметром 12 пикс

и более не приводят к значительной величине погрешности.

3. Для уменьшения влияния шумов предложено принять за нулевые значения сигнала, меньшие, чем удвоенный шаг дискретизации АЦП. Таким образом, СКО определения энергетического центра тяжести ТО уменьшается примерно в четыре раза – до величины 0,005 пикс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, А. А. Оптические измерения: учеб. пособие / А. А. Андреев, Е. В. Гаврилов, Г. Г. Ишанин. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 416 с.
2. Кириловский, В. К. Оптические измерения / В. К. Кириловский, Ле Зуи Туан. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – Ч. 6: Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. – 131 с.
3. **Device** Performance Specification. Kodak KAI-2020, Kodak KAI-2020M, Kodak KAI-2020CM [Electronic resource] // Datasheet Archive. – Mode of Access: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheets-IS20/DSA00392978.pdf>. – Date of Access: 18.03.2015.
4. **Unraveling** Bessel Beams / Angela Dudley [et al.] // *Optic & Photonics News*, 2013. – Vol. 24, No 6. – P. 22–29.
5. **Handbook** of Optics. Vol. II. Design, Fabrication and Testing; Sources and Detectors. Radiometry and Photometry / editors Michael Bass, Virendra N. Mahajan, Eric Van Stryland. – New York: Mc Graw Hill, 2010. – 1264 p.
6. **Методы** компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физмалит, 2003. – 784 с.
7. Федосеев, В. И. Прием пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах (пуассоновская модель) / В. И. Федосеев. – М.: Университетская книга, 2011. – 232 с.
8. Аванесов, Г. А. Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС матрице и коррекция методической ошибки / Г. А. Аванесов, Т. В. Кондратьева, А. В. Никитин // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», г. Таруса 22–25 сентября 2008 г. – М.: Институт космических исследований РАН, 2009. – С. 421–446.
9. Ляшко, О. М. Проектирование оптико-электронных приборов наблюдения: учеб.-метод. пособие / О. М. Ляшко. – Минск: БНТУ, 2009. – 77 с.

10. Белоусов, Ю. И. Особенности алгоритмов цифровой обработки изображений в оптико-электронных системах нового поколения / Ю. И. Белоусов, В. Т. Фисенко // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 8. – С. 7–12.

REFERENCES

1. **Andreev, A. A.**, Gavrilov, E. V., & Ishanin, G. G. (2008) *Optical Measurements*. Moscow, Universitetskaya Kniga. 416 p. (in Russian).
2. **Kirilovsky, V. K.**, & Le Zui Tuan. (2008) *Optical Measurements. Part 6: Innovative Directions in Optical Measurements and Investigations of Optical Systems*. Saint-Petersburg.: Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (SSU ITMO). 131 p. (in Russian).
3. **Device** Performance Specification. Kodak KAI-2020, Kodak KAI-2020M, Kodak KAI-2020CM. *Datasheet Archive*. Available at: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheets-IS20/DSA00392978.pdf>. (Accessed 18 March 2015) (in Russian).
4. **Angela Dudley**, Martin Lavery, Miles Padgett, & Andrew Forbes. (2013) Unraveling Bessel Beams. *Optic & Photonics News*, 24 (6), 22–29.
5. **Michael Bass**, Virendra N. Mahajan, & Eric Van Stryland. (2010) *Handbook of Optics. Vol. II. Design, Fabrication and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry*. New York, Mc Graw Hill. 1264 p.
6. **Soyfer, V. A.**, Gashnikov, M. V., Glumov, N. I., Il'iasova, N. Iu., Miasnikov, V. V., Popov, S. B., & Sergeev, V. V. (2003) *Methods for Computer Image Processing*. 2nd Edition. Moscow, Fizmalit. 784 p. (in Russian).
7. **Fedoseev, V. I.** (2011) *Reception of Spatial-Time Signals in Optoelectronic Devices (Poisson Model)*. Moscow, Universitetskaya Kniga. 232 p. (in Russian).
8. **Avanesov, G. A.**, Kondratieva, T. V., & Nikitin, A. V. (2009) Investigations on Deviations in Star Image Energy Center with Regard to Geometric Center on CCD-Matrix and Correction of Methodical Error. *Russia Scientific-Technical Conference "Modern Problems of Determining the Orientation and Navigation Satellites"*. Moscow: Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (SRI RAS), 421–446 (in Russian).
9. **Liashko, O. M.** (2009) *Designing of Optoelectronic Observation Devices*. Minsk: BNTU. 77 p. (in Russian).
10. **Belousov, Yu. I.**, & Fisenko, V. T. (2009) Particularities in Algorithms of Image Digital Processing in Optoelectronic Systems of Next Generation. *Izv. Vuzov. Priboro-stroenie* [Proceedings of the Higher Education Institutions. Instrument engineering], 52 (8), 7–12 (in Russian).

Поступила 08.06.2015

УДК 330 (476)

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА
ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ПОТРЕБНОСТИ В ЭНЕРГОРЕСУРСАХ**

Часть 2

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК В. Н., асп. МУСЛИНА Д. Б.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Dasha106515@gmail.com

Предлагаемая статья является продолжением работы, опубликованной в предыдущем номере журнала, и предназначена, как отмечалось, специалистам, занятым решением проблем эффективности легкой промышленности Беларуси как одной из отраслей, в большой степени формирующих состояние экономики республики, ее экспортный потенциал и социальный климат. Для сохранения и упрочения позиций отрасли на рынках чрезвычайно актуально снижение ее себестоимости. Производство натуральных, синтетических текстильных и трикотажных материалов и их последующая обработка неоправданно энергоемки. Фундаментальным решением задачи снижения себестоимости продукции является уменьшение ее энергетической составляющей, для чего необходим переход к современным теплоэнергетическим системам в теплотехнологических комплексах предприятий.

В первой части рассматривался круг вопросов, на базе которых получали статистические модели для прогнозирования востребованных объемов производства основных трикотажных и текстильных материалов отрасли. Прогноз составлялся на период более 20 лет, определяемый горизонтом проектирования комплексной модернизации энергообеспечения теплотехнологий предприятий легкой промышленности. Объемы производства существенно расходились с теми, что предусмотрены в программах легкой промышленности.

В данной части статьи показан выбор типа статистической игры для определения темпов наращивания объемов производства каждого отдельно взятого предприятия отрасли. В качестве игры выбрана так называемая «игра с природой», широко используемая при решении аналогичных задач спроса. Здесь применяются полученные в первой части статистические модели прогнозирования производства и рассматриваются стратегии развития отдельных предприятий на примере ОАО «Барановичское производственное хлопчатобумажное объединение». Из полученных стратегий развития с учетом минимизации рисков и достижения максимальной средней ожидаемой прибыли определяются объемы производства данного предприятия. На основе концепции интенсивного энергосбережения можно установить базовую мощность энергопотребления для проектирования собственных когенерационных установок. Концепция предписывает реализацию системного подхода, учитывающего необходимость максимальной утилизации побочных низкотемпературных потоков производства, специфику графиков потребления и генерации энергопотоков, условия промышленного узла, в который входит предприятие, и требования энергосистемы Беларуси в условиях работы АЭС.

Ключевые слова: платежная матрица, индекс риска, математическое ожидание, рентабельность производства, «игра с природой».

Ил. 5. Табл. 8. Библиогр.: 27 назв.

**FORECASTING OF PRODUCTION OUTPUT FOR LIGHT INDUSTRY
ENTERPRISES WITH PURPOSE
TO DETERMINE THEIR POWER RESOURCES REQUIREMENTS**

Part 2

ROMANIUK V. N., MUSLINA D. B.

Belarusian National Technical University

The proposed paper is a continuation of the work, published in the previous issue. It is destined for specialists who are engaged in solution of problems pertaining to efficiency of light industry in Belarus which is considered as one of the branches being significantly involved in formation of national economy, its export potential and social climate. It is extremely relevant to reduce production costs in order to preserve and add strength to the branch positions in the markets. Production of natural, synthetic and knitted materials and their subsequent treatment are unreasonably power-consuming processes.

Fundamental solution of the problem for reduction of production costs is to decrease its energy component and this can be achieved due to transition to modern heat and power systems in technological complexes of enterprises.

The first part of the paper has considered a range of issues that served as a basis for obtaining statistical models in order to forecast the required production volume of main knitted and textile materials. Forecasting has been prepared for a period of more than 20 years because it has been predetermined by development horizon of comprehensive modernization of energy supply systems at enterprises of light industry. The production volumes essentially differ from those that have been stipulated in the programs of light industry.

The present paper shows selection of statistical game-type for determination of build-up rate of the production volume for every textile enterprise. The so-called "Game with Nature" has been selected as a game which is widely used for solution of analogous demand problems. The statistical forecasting models of production obtained in the first part are applied in the second part of the paper which considers strategies for development of individual enterprises. JSC: Baranovich Industrial Cotton Association" has been taken an example in the paper. Production volumes of any enterprise are determined on the basis of the development strategies with due account of risk minimization and obtaining maximum average expected profit. The average expected production of the enterprise is determined from these strategies in the light of minimizing risks and maximizing profits. Fundamental capacity of power consumption for designing their own cogeneration plants can be determined while using the concept of intensive energy saving. The concept prescribes implementation of a systematic approach that takes into account the necessity of maximum utilization of secondary low-temperature production flows, specificity in consumption and generation schedules of energy flows, conditions of an industrial unit that includes the enterprise, requirements of the power system of Belarus under conditions of NPP operation.

Keywords: payment matrix, risk index, statistical expectation, profitability, "game with Nature".

Fig. 5. Tab. 8. Ref.: 27 titles.

Введение. Предлагаемая статья является продолжением работы, опубликованной в предыдущем номере журнала, посвященной прогнозированию объема производства, определяющего проектную мощность собственных энергогенерирующих источников текстильных и трикотажных предприятий. В первой части статьи выбраны методы статистического прогнозирования производства, показана необходимость ориентации на объемы прибыли от реализации продукции при построении статистических моделей спроса. С вероятностью 95 % установлено экономически оправданное планирование увеличения объема производства до 2020 г., которое можно использовать в период 2030–2040 гг.

Во второй части статьи на базе полученных статистических моделей объемов производства с помощью известных статистических теорий игр рассматривается выбор стратегии развития конкретных предприятий и, в конечном итоге, мощность собственного комбинированного энергоисточника на примере ОАО «Барановичское производственное хлопчатобумажное объединение» (ОАО «БПХО»).

Выбор прогнозных показателей, функции цели. Основная задача исследования – определение дальнейшего пути планирования развития предприятия (стратегии развития) в отношении наращивания объемов производства. Для достижения требуемой достоверности планирования следует определить круг исходных данных и показателей, необходимых для решения поставленной задачи. Ранее установлено, что при планировании стратегий развития

предприятия в сложившихся условиях в легкой промышленности страны не оправдывается ориентация непосредственно на статистические и прогнозные показатели объемов производства. В качестве альтернативы предлагается руководствоваться прогнозами экспорта продукции, мировыми тенденциями спроса на нее, а также отраслевыми программами. Показатели, используемые при разработке стратегии развития производства предприятия, ранжируются. К определяющим отнесены прибыль от реализации продукции и рентабельность производства, к второстепенным – выручка от реализации товаров и полная себестоимость реализованных товаров (затраты на производство). Ориентация на прибыль продиктована тем, что этот показатель наиболее полно отражает эффективность производства. Формируется она под воздействием трех основных факторов: себестоимости продукции, объема реализации, уровня действующих цен на реализуемую продукцию. При этом автоматически учитываются упомянутые второстепенные показатели: выручка от реализации товаров и полная себестоимость реализованных товаров. При прогнозировании дополнительно используется показатель рентабельности производства, определяемый как отношение прибыли от реализации продукции к общим затратам [1, 2]. Кроме того, учитывается комплексная программа развития легкой промышленности в отношении внутреннего рынка сбыта текстильной продукции, удельный вес которого в объеме всей продукции составляет 53 % [3].

Задачей каждого конкретного предприятия в рамках планов отрасли является выбор собственного пути наращивания объемов производства, основанный на мировых и внутренних тенденциях, учете специфики собственных рынков сбыта продукции, обеспечении максимальной прибыли с расчетом рискованных ситуаций. Соответствующая оценка приведена в данной статье на примере предприятия ОАО «БПХО», специализирующегося на производстве хлопчатобумажных пряжи и тканей.

Методика статистической игры. Для решения поставленной задачи наиболее подходит математическая модель конфликтной ситуации, получившая название «игра с природой» [1, 4–9]. Термин «природа» в теории игр понимается в широком смысле: это и рынок, противостоящий предпринимателю, и конкурирующая среда, и монополия и т. п. Определенная таким образом «природа» выступает в качестве игрока, который, следует заметить, не конкурирует, не выступает против другого игрока (предпринимателя) и не стремится «специально» навредить последнему. Игрок «природа» (В) наносит определенный урон экономической деятельности противостоящего игрока «предприниматель» (А), но этот урон для игрока А должен быть минимален. Таким образом, на базе указанной стратегии «игры с природой» возможно определить наиболее неблагоприятные условия для игрока А, которые его ожидают, и оценить риски [10]. На базе полученных результатов расчетов для предприятия открывается возможность выбора оптимальной стратегии поведения в различных ситуациях, обеспечивающей максимизацию прибыли за рассматриваемый период.

Инструментом игры с природой является матрица выигрышей, или платежная матрица. В самом общем виде матрица показывает, как платеж зависит от определенных событий, которые могут иметь место. Платежная матрица используется в случаях, когда:

- имеет место ограниченное число альтернатив или вариантов стратегии;
- ожидаемый результат (то, что может случиться) с полной определенностью неизвестен;
- результат принятого решения зависит от выбора альтернативы и действительных событий, имеющих место в настоящий момент.

Для создания платежной матрицы требуется объективно оценить вероятность релевантных событий, т. е. найти ожидаемое значение той или иной вероятности. Вероятность прямо влияет на определение ожидаемого значения – основного понятия платежной матрицы, которым здесь является средняя ожидаемая прибыль, определяемая суммой значений произведений ожидаемой конкретной прибыли на соответствующую вероятность наступления последней [10]. Чаще всего в подобных случаях решения принимаются исходя из максимизации средней ожидаемой прибыли или минимизации ожидаемых издержек. Возможно уточнить принятое решение с помощью дополнительной информации – среднего квадратического отклонения, интерпретируемого как индекс риска. Дополнительные рекомендации по принятию решения могут оказаться субъективными, зависимыми от склонности к риску лица, принимающего решение (ЛПР) [10].

Среднее квадратическое отклонение (индекс риска) σ_x случайной величины X определяется известным соотношением [11–15]:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}, \quad (1)$$

где D_x – дисперсия случайной величины X , определяемая с помощью соотношения $D_x = M(x^2) - (Mx)^2$; M – математическое ожидание.

Вычисления осуществляются для случаев различного увеличения объемов производства с соответствующей им вероятностью, на базе которых и выбирается стратегия развития. Для расчетов значения вероятностей в данном случае используется метод биномиальных деревьев, где вероятность свершения события p рассчитывается по формуле [11]

$$p = \frac{e^{(1-r)\Delta t} - e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}}{e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} - e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}}, \quad (2)$$

где r – процент риска, принимаемый в диапазоне 90–95 %; Δt – шаг времени, принимаемый равным в 1 год; σ – процент колебаний значения увеличения производства.

Результаты статистической игры развития объемов производства на примере ОАО «БПХО». Структура реализации продукции предприятия за период 2010–2013 гг. приведена в табл. 1.

Таблица 1

Структура реализации продукции ОАО «БПХО» [16]

Объем реализации продукции	Год			
	2010	2011	2012	2013
Внутренний рынок, %	94,2	90,9	89,8	84,7
Внешний рынок, %	5,8	9,1	10,2	15,3
Итого, %	100,0	100,0	100,0	100,0

Из табл. 1 следует, что удельный вес товаров внутреннего рынка сбыта в объеме производства текстильной продукции, по данным 2013 г., на предприятии составляет 84,7 % против среднего по отрасли 53,1 % [17]. Удельный вес экспорта в объеме производства – 15,3 %, из которых 13,0 % поступает в страны СНГ, а остальные 2,3 % – в страны дальнего зарубежья [18, 19].

При выборе стратегии учитываются определенные ранее в части 1 статьи мировые тенденции спроса на хлопок (10–12 % к 2020 г. относительно 2011 г.). Прогнозы экспорта, приведенные там же, показывают нецелесооб-

разность планирования наращивания экспорта более чем на 14 % к 2020 г. (относительно 2011 г.). При этом с 2012 по 2015 г. модель прогнозирует снижение экспорта на 2,0 % и начиная с 2015 г. рост должен составлять не более 1,5 % в год. К 2030 г. востребованный объем производства, исходя из прогноза экспорта, с вероятностью 95 % может быть увеличен более чем на 29 %.

Отсутствие данных по внутреннему рынку конкретного предприятия диктует необходимость использовать статистику по розничной торговле в целом для отрасли [17]. При разработке платежных матриц принимали статистические показатели прибыли, затрат и выручки за 2011–2014 гг. (табл. 2; рис. 1, 2).

Данные за кризисный период 2014 г. делают прогноз малооптимистичным. Если в предыдущие годы имеет место определенная повторяемость показателей, то за 2014 г. данные резко отличаются, что осложняет дальнейшее прогнозирование.

Таблица 2

Итоги деятельности ОАО «БПХО», по данным Министерства финансов Республики Беларусь [20]

Наименование показателя	Период			
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	3 кв. 2014 г.
Выручка от реализации товаров, продукции, работ и услуг (за минусом НДС, акцизов и иных аналогичных обязательных платежей), млн руб.	238881	377442	495992	344211
Себестоимость реализации товаров, продукции, работ, услуг, управленческие расходы; расходы на реализацию, млн руб.	203293	340259	438010	343429
Прибыль от реализации продукции, млн руб.	35588	37183	57982	782
Рентабельность продукции, %	17,5	10,9	13,2	0,23

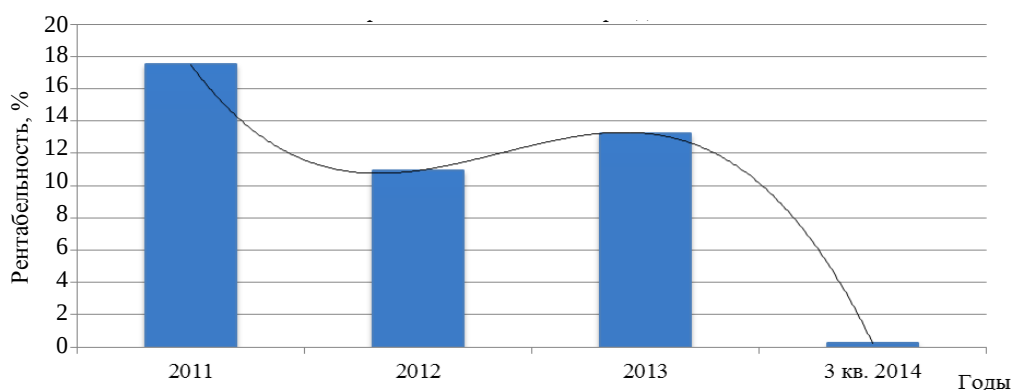


Рис. 1. Динамика изменения показателей рентабельности продукции с 2011 по 2014 г. для ОАО «БПХО»:

■ – рентабельность; — – тренд

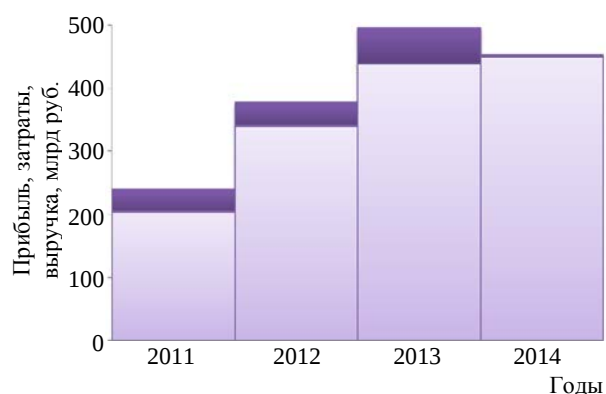


Рис. 2. Показатели прибыли, затрат и выручки (сумма прибыли и затрат) ОАО «БПХО» [20]:
 ■ – затраты; ■ – прибыль

Варианты стратегий. В качестве вариантов повышения объемов производства были приняты пять стратегий разыгрывания ситуаций, основанных на использовании различных вариаций учета внешних и внутренних тенденций

и предписаний при неизменности соотношений удельного веса экспорта и внутреннего рынка в объеме производства. В расчетах применяли метод максимизации суммы математических ожиданий прибыли с учетом вероятности реализации сценария и расчетом среднего квадратического отклонения как индекса риска, позволяющего уточнить решение, принятое на основе максимума прибыли [13–15, 21, 22]. Увеличение объемов принято от минимального до максимально требуемых в соответствии с программой развития отрасли [3, 23–27]. Результаты расчетов выбранных стратегий наращивания производства приведены в табл. 3.

Для создания платежной матрицы необходимо использовать данные табл. 2 по выручке, затратам и прибыли. В платежных матрицах прирост спроса и объемов производства распределен равномерно по годам (табл. 4–7).

Таблица 3

Матрица вариантов увеличения объемов производств

Характеристика	Стратегия				
	1	2	3	4	5
Удельный вес экспорта в страны СНГ в объеме производства, %	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Удельный вес экспорта в страны дальнего зарубежья в объеме производства, %	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Удельный вес товаров, поставляемых на внутренний рынок, в объеме производства, %	84,7	84,7	84,7	84,7	84,7
Повышение поставок хлопка в страны СНГ до 2020 г. согласно прогнозу экспорта, %	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Повышение поставок хлопка в страны дальнего зарубежья до 2020 г. согласно мировым тенденциям спроса на хлопок, %	10,0	10,0	10,0	12,0	12,0
Повышение поставок хлопка на внутренний рынок Республики Беларусь до 2020 г., %	3,5	9,4	14,0	21,0	41,0
Результирующее увеличение объема производства предприятием, исходя из сценария до 2020 г. Рассчитывается: $(с. 1 \times с. 4 + с. 2 \times с. 5 + с. 3 \times с. 6)$, %	5,0	10,0	14,0	20,0	37,0

Таблица 4

Платежная матрица в «игре с природой» за 2011 г.

Увеличение объема производства, %	Спрос, %					Средняя ожидаемая прибыль, млн руб.	Дисперсия случайной величины, млн руб ² .	Среднее квадрати- ческое отклонение, млн руб.
	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5			
	0,6	1,1	1,6	2,2	4,1			
	Вероятность наступления события							
	0,1*	0,2*	0,6*	0,07*	0,03*			
	Прибыль, млн руб.							
0,6	35787	35787	35787	35787	35787	35787	0	0
1,1	34658	35984	35984	35984	35984	35852	158340	398
1,6	33759	35085	36142	36142	36142	35692	589006	767
2,2	32410	33736	34793	36378	36378	34502	957633	979
4,1	28564	29891	30947	32532	37051	30792	2060491	1435
* Здесь и далее в табл. 5–7 приведена вероятность события.								

* Здесь и далее в табл. 5–7 приведена вероятность события.

Таблица 5

Платежная матрица в «игре с природой» за 2012 г.

Увеличение объема производства, %	Спрос, %					Средняя ожидаемая прибыль, млн руб.	Дисперсия случайной величины, млн руб ² .	Среднее квадратическое отклонение, млн руб.
	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5			
	0,6	1,1	1,6	2,2	4,1			
	Вероятность наступления события							
	0,1*	0,2*	0,6*	0,07*	0,03*			
	Прибыль, млн руб.							
0,6	37390	37390	37390	37390	37390	37390	0	0
1,1	35501	37597	37597	37597	37597	37387	395302	629
1,6	33996	36092	37761	37761	37761	37051	1470474	1213
2,2	31738	33834	35504	38008	38008	35044	2390761	1546
4,1	25302	27398	29067	31572	38711	28822	5144082	2268

Таблица 6

Платежная матрица в «игре с природой» за 2013 г.

Увеличение объема производства, %	Спрос, %					Средняя ожидаемая прибыль, млн руб.	Дисперсия случайной величины, млн руб ² .	Среднее квадратическое отклонение, млн руб.
	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5			
	0,6	1,1	1,6	2,2	4,1			
	Вероятность наступления события							
	0,1*	0,2*	0,6*	0,07*	0,03*			
	Прибыль, млн руб.							
0,6	58306	58306	58306	58306	58306	58306	0	0
1,1	55873	58627	58627	58627	58627	58352	682618	826
1,6	53936	56690	58884	58884	58884	57950	2539254	1594
2,2	51030	53784	55978	59269	59269	55373	4128431	2032
4,1	42744	45498	47692	50983	60365	47369	8882941	2980

Таблица 7

Платежная матрица в «игре с природой» за 2014 г.

Увеличение объема производства, %	Спрос, %					Средняя ожидаемая прибыль, млн руб.	Дисперсия случайной величины, млн руб ² .	Среднее квадрати- ческое отклонение, млн руб.
	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5			
	0,6	1,1	1,6	2,2	4,1			
	Вероятность наступления события							
	0,1*	0,2*	0,6*	0,07*	0,03*			
	Прибыль, млн руб.							
0,6	786	786	786	786	786	786	0	0
1,1	−1715	791	791	791	791	540	564921	752
1,6	−3707	−1202	794	794	794	−55	2101436	1450
2,2	−6696	−4190	−2194	799	799	−2744	3416607	1848
4,1	−15216	−12711	−10715	−7721	814	−11009	7351345	2711

На основании полученных матриц определяется наиболее приемлемая стратегия развития предприятия. Анализ полученных платежных матриц за период 2011–2014 гг. указывает, что для ОАО «БПХО» во всех случаях наиболее выигрышными являются 1-й и 2-й вариан-

ты. Однако риски второго варианта не всегда оправданы и существенно выше, чем в первом варианте (рис. 3, 4). В период кризиса следует более осторожно относиться к рискам, не оправдано наращивание производства к 2020 г. более чем на 5–10 %.

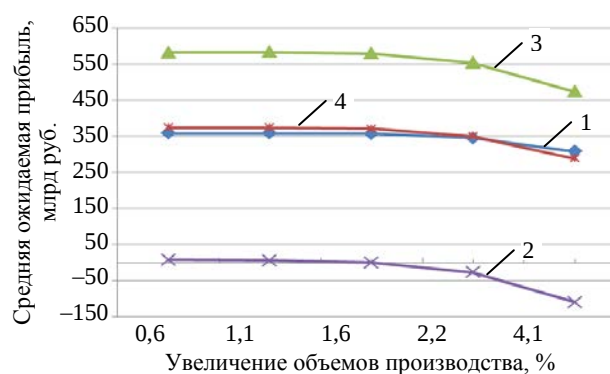


Рис. 3. Показатели средней ожидаемой прибыли при увеличении объемов производства для ОАО «БПХО» согласно платежным матрицам за 2011–2014 гг.: 1 – 2011 г.; 2 – 2012 г.; 3 – 2013 г.; 4 – 2014 г.

Из анализа моделей, построенных по итогам каждого из рассматриваемых периодов, следует, что исходя из некризисных 2011–2013 гг. ежегодный рост объемов производства составляет 0,5–1,1 %. Итоги кризисного 2014 г. указывают на крайнюю чувствительность модели к наращиванию объемов производства в части

роста рисков потери прибыли. Наращивание объемов производства более 2 % в год, согласно результатам игры, может привести к нулевой рентабельности, а издержки превысят выручку. Полученные результаты полностью подтверждаются событиями 2014 г.

Итоги игры повторяются и при ином распределении вероятности наступления событий (табл. 8, рис. 5).

Таблица 8

Варианты распределения вероятности наступления событий

Вариант вероятности	Спрос, %				
	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5
	0,60	1,10	1,6	2,20	4,10
Вероятность наступления события					
1	0,10	0,20	0,60	0,07	0,03
2	0,07	0,03	0,20	0,40	0,30
3	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

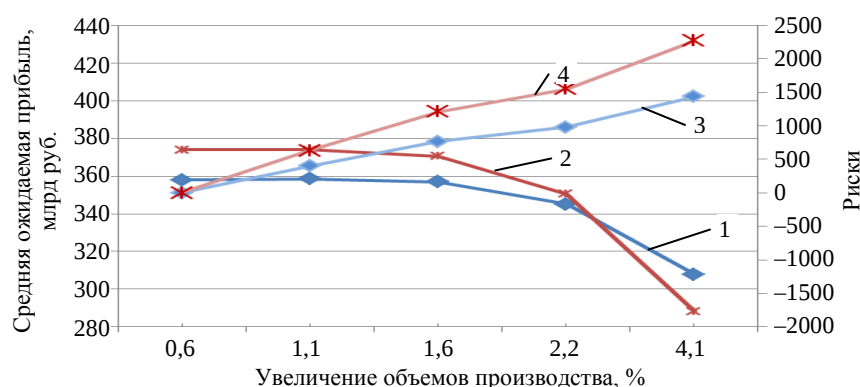


Рис. 4. Средняя ожидаемая прибыль и степень риска при наращивании объемов производства для ОАО «БПХО» на базе данных 2012–2013 гг.: 1 – средняя ожидаемая прибыль в 2011 г.; 2 – то же в 2012 г.; 3 – риски в 2011 г.; 4 – то же в 2012 г.

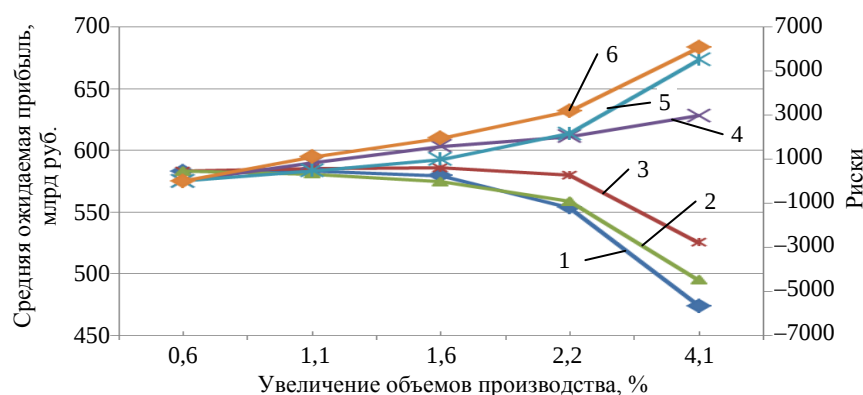


Рис. 5. Средняя ожидаемая прибыль и степень риска при наращивании объемов производства и различных вариациях показателей вероятности наступления событий для ОАО «БПХО» на базе данных 2012–2013 гг.: 1 – средняя ожидаемая прибыль, вариация 1; 2 – то же, вариация 2; 3 – то же, вариация 3; 4 – риски, вариация 1; 5 – то же, вариация 2; 6 – то же, вариация 3

Анализ исследований позволяет сделать вывод о низкой зависимости результатов от распределения вероятности наступления событий: вне зависимости от варианта максимальный результат с минимальным риском ожидается в интервале ежегодного роста объемов производства в пределах 0,6–1,1 %.

Базовая мощность собственного когенерационного энергоисточника предприятия. Проведенные исследования, выбранные методики, полученные расчетно-аналитические модели, вероятностные расчеты достаточны для корректного обоснованного достижения сформулированной цели – расчета базовой мощности когенерационного энергоисточника для предприятий легкой промышленности. В свою очередь, базовая мощность – основополагающий показатель, определяющий структуру энергетического комплекса предприятия и его высокую эффективность эксплуатации.

Согласно результатам статистической «игры с природой», для ОАО «БПХО» рост объемов производства к 2030 г. оценивается до 21 %. Горизонт расчета для когенерационных энергоисточников – 15–20 лет. Используя приведенную величину, с учетом коэффициента теплофикации, значения которого для тепло-технологий достигают 70 %, мероприятий по использованию низкотемпературных побочных потоков производства, которые позволяют вернуть до 30 % потребляемой тепловой энергии, базовая мощность теплогенерирующего источника для рассматриваемого предприятия составляет 60 % от существующей максимальной нагрузки. В структуре энергопотребления ОАО «БПХО» соотношение между потоками тепловой и электрической энергии равно 52/32. Согласно оценке, тепловая базовая мощность составит порядка 31 %, электрическая мощность возрастет до 38 %. В этом случае электрическая и тепловая мощности когенерационного источника при применении современных двигателей внутреннего сгорания с электрическим абсолютным КПД 43–45 % могут быть приняты равными и определяться требуемой базовой тепловой мощностью. В качестве пиково-аварийных мощностей будут использоваться Объединенная энергетическая система (ОЭС) Беларуси и паровой источник, в роли которого следует рассмотреть собственные па-

ровые котлы или ТЭЦ ОЭС страны. Использование поршневых двигателей внутреннего сгорания позволит в часы ночных провалов нагрузки ОЭС страны отключать собственную генерацию, что будет крайне эффективно при работающей АЭС.

ВЫВОД

Определены подходы и алгоритмы расчета оптимальных темпов роста объемов производства предприятий отрасли, использованы статистические методы прогнозирования ряда показателей деятельности предприятий, разработаны модели развития предприятий с привлечением решений так называемой задачи «игры с природой». Разработано частное приложение этой игры применительно к предприятиям легкой промышленности. Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать мощность собственных источников энергообеспечения, что ведет к снижению энергетической составляющей себестоимости продукции и как результат повышению конкурентоспособности и устойчивости предприятий отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеева, М. М.** Планирование деятельности фирмы / М. М. Алексеева; Финанс. академия при Прав-ве РФ. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 246 с.
2. **Маркетометрия** – измерения рынка. Книга-тренажер. Часть 8 [Электронный ресурс] // Маркетинг журнал 4р. – Режим доступа: http://www.4p.ru/main/theory/2573/?sphrase_id=667659. – Дата доступа: 20.05.2014.
3. **Комплексная** программа развития легкой промышленности Республики Беларусь на 2011–2015 гг. с перспективой до 2020 г. [Электронный ресурс] // Беллегпром [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.bellegprom.by/programs>. – Дата доступа: 02.10.2013.
4. **Голубков, Е. П.** Маркетинговые исследования: теория, методология и практика / Е. П. Голубков. – М.: Финпресс, 1998. – 416 с.
5. **Risikoaggregation in der Praxis / Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen/ Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement.** – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – 250 p.
6. **Gaynor, Patricia E.** Introduction to Time-Series Modeling and Forecasting in Business and Economics / Patricia E. Gaynor, Rickey C. Kirkpatrick. – New York; London: McGraw-Hill, 1994. – 625 p.
7. **Granger, Clive W. J.** Forecasting in Business and Economics / Clive W. J. Granger. – New York [u.a.]: Academic Pr., 1981. – 226 p.

8. **Pflug, Georg Ch.** Modeling, Measuring and Managing Risk / Georg Ch. Pflug, Werner Römisch. – New Jersey [u.a.]: World Scientific, 2007. – 286 p.

9. **Злобина, Н. В.** Управленческие решения: учеб. пособие / Н. В. Злобина. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 80 с.

10. **Моделирование** рискованных ситуаций в экономике и бизнесе [Электронный ресурс] // bibliotekar.ru. – Режим доступа: <http://bibliotekar.ru/riskovye-situacii-2/16.htm>. – Дата доступа: 20.05.2014.

11. **Hull, J.** Optionen, Futures und Andere Derivate / J. Hull. – 6th ed. – München [u.a.]: Pearson Studium, 2007. – 946 p.

12. **Larson, Harold J.** Introduction to Probability Theory and Statistical Inference / Harold J Larson. – New York [u.a.]: Wiley, 1982. – 637 p.

13. **Spanos, Aris.** Probability Theory and Statistical Inference / Econometric Modeling with Observational Data / Aris Spanos. Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press, 2000. – 815 p.

14. **North, D. Warner.** Probability Theory and Consistent Reasoning / D. Warner North // Risk Analysis. – 2010. – Vol. 30 (3). – P. 377–380.

15. **Von Neumann, J.** Theory of Games and Economic Behavior / J. Von Neumann, O. Morgenstern // Princeton [u.a.]: Princeton Univ. Press, 2004. – P. 739.

16. **Легкая** промышленность Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Presentation by Ewa Gulida. – Режим доступа: <http://prezi.com/tjllly7wrfca/copy-of/>. – Дата доступа: 01.10.2014.

17. **Розничная** торговля [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/otrasli-statistiki/torgovlya/roznichnaya-torgovlya>. – Дата доступа: 21.02.2014.

18. **Внешняя** торговля Республики Беларусь, 2014 [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: http://belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/otrasli-statistiki/torgovlya/vneshnyaya-torgovlya_2/ofitsialnye-publikatsii_12/. – Дата доступа: 21.02.2014.

19. **Отчет** правительства, Национального банка о работе экономики за 2014 г. и прогнозе на 2015 г. [Электронный ресурс] // Президент Республики Беларусь. Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: http://www.president.gov.by/ru/news_ru/view/otchet-pravitelstva-natsionalnogo-banka-o-abote-ekonomiki-za-2014-god-i-prognoze-na-2015-god-10158/. – Дата доступа: 20.03.2015.

20. **Итоги** деятельности ОАО // Министерство финансов Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://www.minfin.gov.by/securities_department/results/results_OAO/. – Дата доступа: 06.05.2015.

21. **Tarko, Vlad.** Can Probability Theory Deal with Entrepreneurship? / Vlad Tarko // The Review of Austrian Economics. – 2013. – Vol. 26 (3). – P. 329–345.

22. **McKinsey, J. C. C.** Introduction to the Theory of Games / J. C. C. McKinsey. Dover Publications, 2012. – 384 p.

23. **О комплексном** бизнес-плане развития льняной отрасли Республики Беларусь в 2013–2015 гг.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 20 марта 2013 г.,

№ 201 [Электронный ресурс] // Национальный правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21300201&p1=1>. – Дата доступа: 26.03.2015.

24. **Программа** развития промышленного комплекса Республики Беларусь на период до 2020 г.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 5 июля 2012 г., № 622 [Электронный ресурс] // Министерство экономики Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.economy.gov.by/nfiles/001146_12850_Programma.pdf. – Дата доступа: 06.05.2014.

25. **Национальная** программа развития экспорта Республики Беларусь на 2011–2015 гг.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23 мая 2011 г., № 656 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2011. – № 60. – 5/33840.

26. **Национальная** стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 г. / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь; редкол.: Л. М. Александрович [и др.]. – Минск: Юнипак, 2004. – 202 с.

27. **Отраслевая** стратегия действий концерна «Беллегпром» в условиях ЕЭП на период до 2017 г.: разработанная в соответствии с поручением Совета Министров Респ. Беларусь, 10 мая 2012 г., № 07/500-197 [Электронный ресурс] // Беллегпром. – Режим доступа: http://www.bellegprom.by/docs/otraslevaya_strategiya.pdf. – Дата доступа: 06.05.2014.

REFERENCES

1. **Alexeeva, M. M.** (1997) *Planning of Company's Activity*. Moscow, Finance and Statistics. 246 p. (in Russian).

2. **Market Metria** – Market Measurement. Training Manual. Part 8. *Marketing Journal 4p*. Available at: http://www.4p.ru/main/theory/2573/?sphrase_id=667659. (Accessed 20 May 2014) (in Russian).

3. **Complex** Programme on Development of Light Industry in the Republic of Belarus for 2011–2015 with Prospects till 2020. *Bellegprom*. Available at: <http://www.bellegprom.by/programms>. (Accessed 2 October 2013).

4. **Golubkov, E. P.** (1998) *Marketing Investigations: Theory, Methodology and Practice*. Moscow, Finpress. 416 p. (in Russian).

5. **Deutsche** Gesellschaft für Risikomanagement. (2008) *Risikoaggregation in der Praxis. Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen* [Risk Aggregation in Practice. Examples and Procedures of the Risk Management of Companies]. Berlin; Heidelberg, Springer. 250 p. (German).

6. **Gaynor, Patricia E., & Kirkpatrick, Rickey C.** (1994) *Introduction to Time-Series Modeling and Forecasting in Business and Economics*. New York; London: McGraw-Hill. 625 p.

7. **Granger, Clive W. J.** (1981) *Forecasting in Business and Economics*. New York, Academic Pr. 226 p.

8. **Pflug, Georg Ch., & Römisch, Werner.** (2007) *Modeling, Measuring and Managing Risk*. New Jersey, World Scientific. 286 p.

9. **Zlobina, N. V.** (2007) *Managerial Decisions*. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University. 80 p. (in Russian).
10. **Modeling** of Risk Situations in Economics and Business. *Bibliotekar.ru*. Available at: <http://bibliotekar.ru/riskovye-situacii-2/16.htm>. (Accessed 20 May 2014) (in Russian).
11. **Hull, J.** (2007) *Optionen, Futures und Andere Derivate*. 6th ed. München, Pearson Studium. 946 p. (German).
12. **Larson, Harold J.** (1982) *Introduction to Probability Theory and Statistical Inference*. New York, Wiley. 637 p.
13. **Spanos, Aris.** (2000) *Probability Theory and Statistical Inference. Econometric Modeling with Observational Data*. Cambridge, Cambridge Univ. Press. 815 p.
14. **North, D. Warner.** (2010) Probability Theory and Consistent Reasoning. *Risk Analysis*, 30 (3), 377–380. Doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01362.x.
15. **Von Neumann, J., & Morgenstern, O.** (2004) *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, Princeton Univ. Press. 739 p.
16. **Light** Industry of the Republic of Belarus. *Presentation by Ewa Gulida*. Available at: <http://prezi.com/tjlyy7wrfca/copy-of/>. (Accessed 1 October 2014) (in Russian).
17. **Retail** Trading. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <http://belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/otrasli-statistiki/torgovlya/roznichnaya-torgovlya>. (Accessed 21 February 2014) (in Russian).
18. **Foreign** Trade of the Republic of Belarus, 2014. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: http://belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/otrasli-statistiki/torgovlya/vneshnyaya-torgovlya_2/ofitsialnye-publikatsii_12/. (Accessed 21 February 2014) (in Russian).
19. **Report** of Government, National Bank on Economic Activity in 2014 and Forecasting for 2015. *President of the Republic of Belarus. Official Internet Portal of President of the Republic of Belarus*. Available at: http://www.president.gov.by/ru/news_ru/view/otchet-pravitelstva-natsionalnogo-banka-o-rabote-ekonomiki-za-2014-god-i-prognoze-na-2015-god-10158/. (Accessed 20 March 2015) (in Russian).
20. **Joint** Stock Company (JSC) Results. (2014) *Ministry of Finance of the Republic of Belarus*: Available at: http://www.minfin.gov.by/securities_department/results/results_OAO/. (Accessed 6 May 2015) (in Russian).
21. **Tarko, Vlad.** (2013) Can Probability Theory Deal with Entrepreneurship? *The Review of Austrian Economics*, 26 (3), 329–345. Doi: 10.1007/s11138-012-0193-5.
22. **McKinsey, J. C. C.** (2012) *Introduction to the Theory of Games*. Dover Publications. 384 p.
23. **On Complex** Business Plan for Development of Linen Industry in the Republic of Belarus for 2013–2015: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, March 20, 2013, No 201. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21300201&p1=1>. (Accessed 26 March 2015) (in Russian).
24. **Programme** for Development of Industrial Complex of the Republic of Belarus for the Period up to 2020 Year: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, July 5, 2012, No 622. *Ministry of Economics of the Republic of Belarus*. Available at: http://www.economy.gov.by/nfiles/001146_12850_Programma.pdf. (Accessed 6 May 2014) (in Russian).
25. **National** Programme for Development of Export in the Republic of Belarus for 2011–2015: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated May 23, 2011, No 656. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus'* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2011, 60, 5/33840 (in Russian).
26. **Alexandrovich, L. M.** National Commission on Sustainable Development of the Republic of Belarus. (2004) *National Strategy for Sustainable Social and Economic Development of the Republic of Belarus for the Period till 2020*. Minsk: Unipak. 202 p. (in Russian).
27. **Sectoral** Strategy of “Bellegprom” Concern Activity Under Conditions of Common Free Market Zone (CFMZ) for the Period till 2017: The Strategy Has Been Developed in Accordance with the Assignments of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, May 10, 2012, No 07/500-197. *Bellegprom* [Electronic Resource]. Available at: http://www.bellegprom.by/docs/otraslevaya_strategiya.pdf. (Accessed 6 May 2014) (in Russian).

Поступила 30.03.2015