

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ВЕСТНИК**

**ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ДВАДЦАТЬ СЕДЬМОЙ ВЫПУСК**

**ВИТЕБСК 2014**

**Редакционная коллегия:**

Главный редактор – д.т.н., профессор Башметов В.С.

Зам. главного редактора – д.э.н., профессор Ванкевич Е.В.

Ответственный секретарь – д.т.н., профессор Рыклин Д.Б.

**Члены ред. коллегии**

**Технология и оборудование легкой промышленности и машиностроения**

- Редактор – д.т.н. Рубаник В.В. (ВГТУ)
- к.т.н., доц. Бондарева Т.П. (ВГТУ)
  - д.т.н., доц. Буркин А.Н. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Гарская Н.П. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Горбачик В.Е. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Загайгора К.Ф. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Казарновская Г.В. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Клименков С.С. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Коган А.Г. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Кузнецов А.А. (ВГТУ)
  - д.ф.-м.н., проф. Корниенко А.А. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Локтионов А.В. (ВГТУ)
  - к.т.н. Муха П.И. (РУП «Центр научных исследований легкой промышленности»)
  - д.т.н., проф. Николаев С.Д. (МГУДТ)
  - к.т.н., проф. Ольшанский В.И. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Пятов В.В. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Садовский В.В. (БГЭУ)
  - д.т.н., доц. Сакевич В.Н. (ВГТУ)
  - д.т.н., проф. Сторожев В.В. (МГУДТ)
  - д.т.н., проф. Сункуев Б.С. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Трутченко Л.И. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Шеверина Л.Н. (ВГТУ)

**Химическая технология и экология**

- Редактор – д.т.н., проф. Ковчур С.Г. (ВГТУ)
- д.т.н., проф. Жарский И.М. (БГТУ)
  - академик НАН РБ Лиштван И.И.
  - д.т.н., член-кор. НАНБ Пантелеенко Ф.И. (БНТУ)
  - к.х.н., доц. Платонов А.П. (ВГТУ)
  - к.х.н., доц. Стёпин С.Г. (ВГТУ)
  - к.т.н., доц. Ясинская Н.Н. (ВГТУ)

**Экономика**

- Редактор – к.т.н., доц. Касаева Т.В. (ВГТУ)
- д.э.н., проф. Богдан Н.И. (БГЭУ)
  - д.э.н., проф. Быков А.А. (БГЭУ)
  - д.э.н., проф. Коседовский В.  
(Университет им. Н. Коперника, Республика Польша)
  - д.с.н., проф. Меньшиков В.В. (Даугавпилсский университет, Латвия)
  - д.э.н., проф. Нехорошева Л.Н. (БГЭУ)
  - д.э.н., проф. Панков Д.А. (БГЭУ)
  - к.э.н., доц. Прокофьева Н.Л. (ВГТУ)
  - д.э.н., доц. Яшева Г.А. (ВГТУ)

Журнал включен в перечень научных изданий Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований и в информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования».

Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 72,  
тел.: 8-0212-47-90-40

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

ISBN 978-985-481-367-7

Тексты набраны с авторских оригиналов

© УО «Витебский государственный  
технологический университет», 2014

## Технология и оборудование легкой промышленности и машиностроения

<b>Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г.</b> Интенсификация процесса термообработки химических высокоусадочных нитей.....	9
<b>Голубкова В.Т., Бондарева Е.В.</b> Обоснование выбора вспомогательных приемов выполнения технологических операций .....	17
<b>Грот Д.В., Сункуев Б.С., Кириллов А.Г.</b> Кинематический анализ механизма прижимной лапки вышивального полуавтомата .....	25
<b>Дягилев А.С., Бизюк А.Н., Коган А.Г.</b> Исследование качественных характеристик белорусского длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года .....	31
<b>Кузнецов А.А.</b> Исследование изменения защитных свойств боевой одежды пожарных при многоцикловых эксплуатационных воздействиях.....	38
<b>Кузнецов А.А.</b> Особенности деформирования и разрушения полипропиленовых комплексных нитей различного способа получения.....	46
<b>Надёжная Н.Л., Чарковский А.В., Луд Н.Г., Шляхтунов Е.А.</b> Разработка конструкции трикотажного компрессионного рукава медицинского назначения .....	53
<b>Назаренко Е.В., Рыклин Д.Б., Соколов С.В.</b> Имитационное моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон .....	62
<b>Ольшанский А.И., Жерносек С.В.</b> Исследование терморadiационной сушки технических тканей с использованием комплексных безразмерных критериев теплоплемассобмена .....	70
<b>Ольшанский В. И., Окунев Р. В.</b> Исследование движения жидкостного полимера при ракельном способе нанесения.....	82
<b>Парманчук В.В., Ольшанский В.И.</b> Теплофизические свойства многослойных теплоизоляционных материалов.....	87
<b>Пятов В. В.</b> Трение на поверхности формирующего инструмента .....	94

**Ульянова Н.В., Рыклин Д.Б.**

Влияние различных факторов на степень закрепления волокнистого покрытия на поверхности армированных нитей .....98

## **Химическая технология и экология**

**Алексеев И.С., Дорошенко И.А.**

Определение фотокаталитической активности  $TiO_2$  методом осаждения серебра ..... 108

**Витязь П.А., Жорник В.И., Ковалева С.А., Талако Т.Л., Григорьева Т.Ф.**

Формирование структуры металлоксидных порошков на основе меди и железа в условиях механической активации..... 113

**Горанский Г.Г., Хина Б.Б., Жорник В.И., Поболь А.И.**

Термодинамическая модель оценки энергии активации процесса кристаллизации многокомпонентной аморфной фазы ..... 126

**Дорошенко И.А., Алексеев И.С.**

Влияние сшивающих агентов на набухание поливинилового спирта в воде ..... 136

**Дубина А. В., Марцунь В. Н.**

Использование лигносульфонатов для очистки сточных вод, содержащих компоненты карбамидоформальдегидных смол ..... 141

**Матвейко Н.П., Брайкова А.М., Садовский В.В.**

Содержание тяжелых металлов в дыме сигарет..... 146

**Савенок В.Е., Марущак А.С.**

Определение выбросов загрязняющих веществ от очистных сооружений объектов нефтехимического комплекса..... 153

**Семёнова Е.И., Бублиенко Н.А., Шилофост Т.А.**

Очистка нефтесодержащих сточных вод..... 161

**Царюк Т.Я., Сакевич В.Н., Фалюшина И.П., Ажаронак В.В., Посканная Е.С.**

Повышение защитной эффективности олеиновой кислоты с помощью магнитного поля и кавитации ..... 168

## **Экономика**

**Касаева Т.В., Андриянова О. М.**

Сбалансированная система показателей и ее инновационная составляющая..... 175

**Квасникова В.В., Левшицкая О.Р.**

Оценка эффективности использования экспортного потенциала организаций по  
производству обуви: методика и апробация ..... 185

**Половцев М.В.**

Альтернативная схема проведения внутриреспубликанского зачета кредиторской и  
дебиторской задолженностей на основе линейной экономико-математической модели..... 200

**Сведения об авторах..... 208**

**Памятка авторам научно-технического журнала «Вестник Витебского государственного  
технологического университета» ..... 213**

# CONTENT

## Technology and machinery of light industry and machine building

<b>Biziuk Andrei., Zhernosek Sergei, Yasinskaya Natal'ya, Ol'shanskii Valerii , Kogan Alexander</b> Intensification of the heat treatment process of chemical high shrinkage yarns .....	9
<b>Golubkova Valentina, Bondareva Elena</b> Investigation of the choice regularities of the auxiliary methods for performing the processing operatins.....	17
<b>Grot Dmitry, Sunkuev Boris, Kirillov Aleksey</b> Kinematic analysis of the mechanism of the presser foot embroidery semiautomatic .....	25
<b>Dyagilev Andrey, Biziuk Andrei, Kogan Alexander</b> Investigation of belarussian long scutched flax fiber quality characteristics of 2013-th year crop .....	31
<b>Kuznetsov Aleksandr</b> Research of change of protective properties of fire fighter's protective clothing at multicyclic operational action .....	38
<b>Kuznetsov Aleksandr</b> Features of deformation of complex polypropylene threads of the various way of manufacture .....	46
<b>Nadyozhnaya Natalia, Charkovsky Aleksandr, Lud Nikolaj, Shljahtunov Evgenij</b> Development of the medical compression arm sleeve construction .....	53
<b>Nazarenko Ekaterina, Sokolov Sergey, Ryklin Dzmitry</b> Simulation of extension and break of the fiber bundle .....	62
<b>Ol'shansky Anatolii, Zhernosek Sergei</b> Study of thermo-radiating of drying technical fabrics using complex dimensionless criteria of heat and mass transfer .....	70
<b>Olshanskiy Valerii, Okunev Roman</b> Research of liquid polymers movement by means of wiping blade application .....	82
<b>Parmanchuk Vera, Olshanskiy valerii</b> Study of thermophysical properties of multilayered thermal insulation textile materials.....	87
<b>Pyatov Vladislav</b> Friction on the surface of the forming tool.....	94

**Ulyanova Natalya, Ryklin Dzmitry**

Investigation of influence various factors on the fibrous covering fixing on the surface of core-spun yarns .....98

**Chemical technology and ecology****Alekseev Igor', Doroshenko Il'ja**

Determination of photocatalytic activity of  $TiO_2$  by sedimentation of silver..... 108

**Vitjaz' Petr, Zhornik Viktor, Kovaleva Svetlana, Talako Tat'jana, Grigor'eva Tat'jana**

The structures of metal oxide powders on the basis of copper and iron under the conditions of mechanical activation..... 113

**Goransky Georg, Khina Boris, Zhornik Victor, Pobol Alexey**

Thermodynamic model for estimating the activation energy of the crystallization of multicomponent amorphous phase ..... 126

**Doroshenko Il'ja, Alekseev Igor'**

Effect of cross-linking agents for PVA swelling in water..... 136

**Dubina Aliksandr, Marcul Vladimir**

Use of lignosulfonate for wastewater treatment, containing components of urea-formaldehyde resins ..... 141

**Matveiko Nikolay, Braikova Alla, Sadovsky Viktor**

The content of heavy metals in cigarette smoke..... 146

**Savenok Vladimir, Marushak Aleksei**

Definition of emissions of the polluting substances from treatment facilities of objects of the petrochemical complex ..... 153

**Semenova Elena, Bublenco Nataliya, Shilofost Tatiana**

Refining of oil containing wastewater ..... 161

**Carjuk Tat'jana, Sakevich Valerij, Faljushina Irina, Azharonak Viktor, Poskannaja Ekaterina**

Increase of the protective efficiency of oleic acid using rfh field and cavitation ..... 168

**Economics****Kasaeva Tamara, Anryinava Volha**

The balanced scorecard and its innovation aspect ..... 175

**Kvasnikova Vera, Liaushytskaya Olga**

Evaluating of the effectiveness of export potential of shoes manufacturing companies: method and approval ..... 185

**Polautsau Maksim**

An alternative scheme of accounts payable and receivable intrarepublican offset on the base of linear economic-mathematical model..... 200

**Information about authors**..... 208

**Reference quide for authors of scientific-technical journal «Vestnik of Vitebsk State Technological Univrsity»** ..... 213



## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ХИМИЧЕСКИХ ВЫСОКОУСАДОЧНЫХ НИТЕЙ

А.Н. Бизюк, С.В. Жерносек, Н.Н. Ясинская,  
В.И. Ольшанский, А.Г. Коган

УДК 677.494.675.022.78

### РЕФЕРАТ

*ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВЫСОКООБЪЕМНАЯ ПРЯЖА, ХИМИЧЕСКИЕ ВЫСОКОУСАДОЧНЫЕ НИТИ, ТЕРМООБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ СВЧ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, УСАДКА*

*Объектом исследований является процесс повышения объемности химических высокоусадочных нитей в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона.*

*Цель работы – разработка энергоэффективной технологии повышения объемности текстильных материалов из натуральных и химических волокон с использованием электромагнитных волн сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.*

*В результате экспериментальных и теоретических исследований процесса термообработки текстильных материалов из натуральных и химических волокон в условиях СВЧ-нагрева разработана методика проведения исследований технологического процесса повышения в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ диапазона, получены математические модели зависимости усадки комбинированных высокоусадочных нитей от основных параметров СВЧ обработки, позволяющие рассчитывать рациональные режимы процесса повышения объемности текстильных материалов, проведена оптимизация основных параметров процесса отделки.*

### ABSTRACT

*TEXTILE FABRICS, YARN HIGH VOLUME, CHEMICAL HIGH SHRINKAGE YARN, HEAT TREATMENT, MICROWAVE ELECTROMAGNETIC WAVES, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES, SHRINKAGE*

*The research object is the process of the volume improving of high shrinkage chemical threads under the influence of electromagnetic waves in the microwave range.*

*The work purpose is development of energy efficient technologies to increase the volume of textile materials made of natural and chemical fibers with using of electromagnetic waves of microwave (UHF) range.*

*As a result of experimental and theoretical studies of the process of heat treatment of textile materials made of natural and chemical fibers under conditions of microwave heating the authors have developed a technique for researching the technological process of volume improving under the influence of electromagnetic waves in the microwave range. The authors have obtained a mathematical model of the dependency of shrinkage combined high shrinkage threads on the main parameters of microwave processing to calculate a rational modes of the process of improving the volume of textile materials. The authors have conducted the optimization of the main parameters of the finishing process.*

### ВВЕДЕНИЕ

Принцип изготовления текстильных материалов, обладающих специфическими свойствами (высокой усадкой и повышенной объемностью), основан на смешивании высокоусадочных (с усадкой 20–60 %) и низкоусадочных волокон

и нитей. В результате производится текстильный материал, обладающий способностью увеличивать свой объем в результате термовлажностной обработки в свободном (ненатянтом) состоянии. При этом высокоусадочный компонент укорачивается (усаживается), принимая

более определенную ориентацию по оси материала. Низкоусадочный компонент обвивается вокруг высокоусадочного, принимая менее ориентированное положение в том же направлении. Это придает материалу большую пушистость, значительно уменьшает объемную массу и увеличивает поперечные размеры.

При производстве высокообъемных текстильных материалов из натуральных и химических волокон основным процессом является процесс релаксации высокоусадочного компонента и повышение их объемности путем обработки в среде горячего воздуха или пара.

Одним из способов повышения качества и интенсификации процессов повышения объемности текстильных материалов является использование электромагнитных волн сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Преимущество СВЧ-нагрева по сравнению с конвективным способом подвода тепла обусловлено возможностью равномерного и быстрого нагрева текстильных материалов как малой, так и большой поверхностной плотности [1].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является определение параметров процесса повышения объёмности текстильных материалов с использованием электромагнитных волн СВЧ-диапазона, обеспечивающих снижение энергоёмкости базовых процессов.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе в качестве высокоусадоч-

ного компонента использовалась полиэфирная комплексная нить линейной плотности 16.8 текс, полученная на Светлогорском ПО «Химволокно» способом физической модификации. В качестве низкоусадочного компонента использовалось хлопковое волокно.

Получение комбинированной высокоусадочной нити линейной плотности 40 текс осуществлялось на прядильно-крутильной машине ПК-100. Физико-механические показатели комбинированной высокоусадочной нити представлены в таблице 1.

Методика проведения исследований процесса повышения объемности текстильных материалов с использованием электромагнитных волн СВЧ состояла из следующих этапов:

- подготовка образцов комбинированных высокоусадочных нитей.
- увлажнение комбинированных высокоусадочных нитей.
- отжим до остаточного влагосодержания 100–200 %.
- установка стационарного теплового режима при заданной мощности 100, 300, 600 или 850 Вт.
- определение абсолютной линейной усадки образцов и её пересчет в относительную.

Влагосодержание образцов комбинированных высокоусадочных нитей определялось весовым способом. Временные интервалы задавались с помощью их установки на СВЧ-камере.

Для исследования процесса усадки в условиях СВЧ-воздействия проведен эксперимент, результаты которого представлены в таблице 2.

<i>Таблица 1 – Физико-механические показатели комбинированной высокоусадочной нити</i>	
Показатель	Значение показателя
<b>Состав: полиэфирная высокоусадочная нить –40 % ; хлопковое волокно – 60 %</b>	
Линейная плотность комбинированной нити, текс	40.35
Разрывная нагрузка, сН	763.45
Коэффициент вариации по разрывной нагрузке, %	4.39
Разрывное удлинение, %	22.30
Крутка, кр/м	528.7
Коэффициент вариации по крутке, %	1.30
Усадка, %	35.98
Диаметр нити после термообработки, мм	0.780

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

По результатам экспериментов методом наименьших квадратов была получена регрессионная модель зависимости усадки высокоусадочной нити от начальной влажности, мощности СВЧ-излучения и времени обработки [2]:

$$s = \frac{\tau \cdot P \cdot W}{(2,20 \cdot \tau + 193) \cdot (-0,197 \cdot P - 17) \cdot (0,515 \cdot 10^{-3} \cdot W - 5,08)}, \quad (1)$$

где *s* – относительная усадка, %; *τ* – время термообработки, с; *P* – мощность излучения, Вт; *W* – относительная влажность образцов до термообработки, %.

На рисунке 1 изображены зависимости усадки высокоусадочной нити от режимов процесса термообработки при воздействии СВЧ-излучения при различной начальной влажности.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при одинаковых значениях режимных параметров процесса термообработки увеличение начальной влажности образцов приводит к повышению усадки.

Для мощности СВЧ-излучения 450 Вт зависимости усадки от времени обработки при различной начальной влажности представлены на рисунке 2.

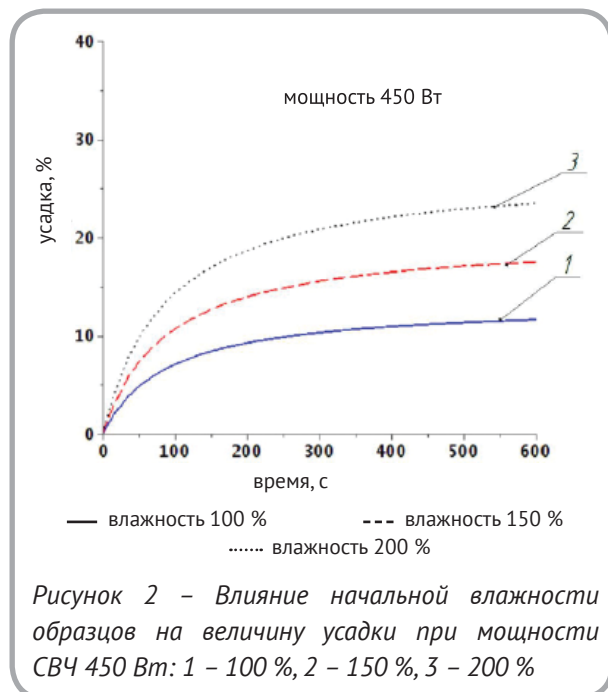
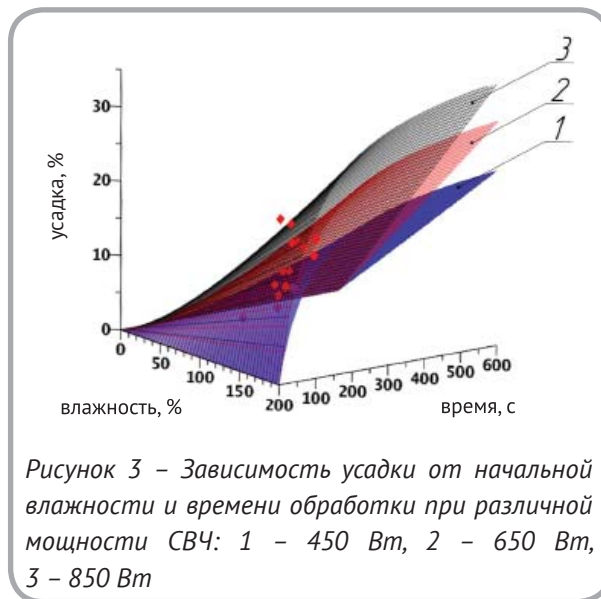
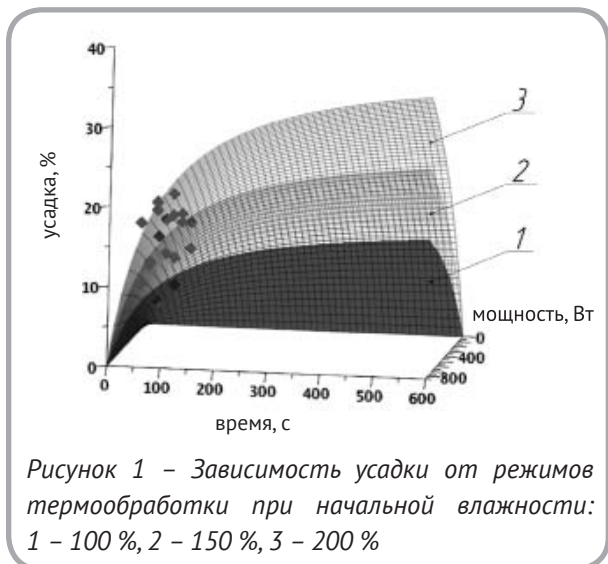
На рисунке 3 изображены зависимости усадки высокоусадочной нити от режимов процесса термообработки при воздействии СВЧ-излучения при различной мощности СВЧ-излучения.

Установлено, что при одинаковых значениях начальной влажности и времени обработки увеличение мощности СВЧ-излучения приводит к повышению усадки. Для начальной влажности 150 % зависимости усадки от времени обработки при различной мощности СВЧ-излучения представлены на рисунке 4.

Анализ зависимостей показал, что одинаковых значений усадки при одном и том же времени обработки можно достичь различными комбинациями начальной влажности и мощности СВЧ-излучения. На рисунке 5 продемонстрировано совпадение графиков усадки образцов при двух комбинациях начальной влажности

*Таблица 2 – Экспериментальные данные по определению усадки*

Влажность, %	Мощность, Вт	Время, с	Усадка, %
127,44	450	60	5,78
207,10	450	60	13,92
156,99	450	90	7,94
176,13	450	90	11,31
158,27	450	120	12,60
188,52	450	120	15,84
180,57	650	60	12,00
166,91	650	60	11,67
163,78	650	90	13,10
189,27	650	90	17,37
167,00	650	120	17,13
191,69	650	120	18,13
171,73	850	60	10,38
188,87	850	60	18,10
173,72	850	90	19,76
206,46	850	90	20,77
146,55	850	120	19,20
204,13	850	120	21,88



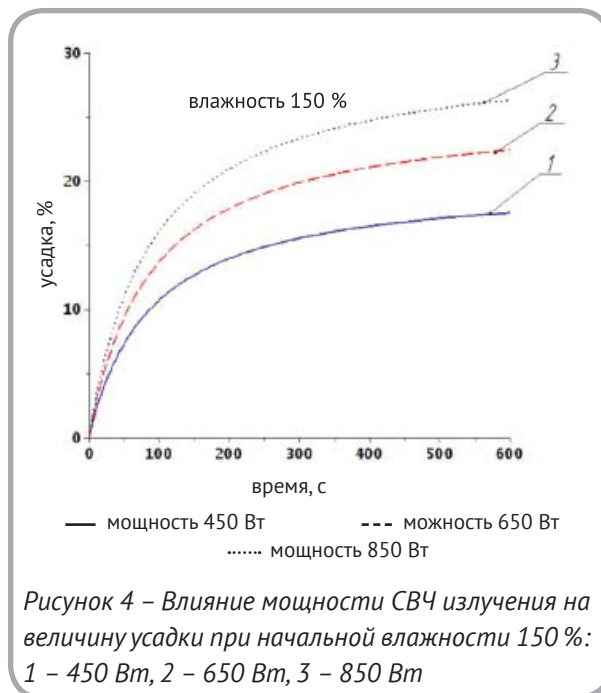
$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{1/k}, \quad (2)$$

где  $d_i$  – частные функции желательности ( $i \in [1..k]$ ),  $k$  – количество частных функций желательности.

Частные функции желательности  $d_i$  определяются путем нормализации результирующих функций  $Y_i$  таким образом, чтобы значения  $d_i$  лежали в пределах от 0 до 1, так как результирующие показатели могут иметь различные едини-

и мощности СВЧ-излучения: 300 Вт, 200 % и 850 Вт, 100 %.

При решении однокритериальной задачи оптимизации находится оптимальное значение одного результирующего показателя. Но в рассматриваемой задаче нужно найти такие параметры процесса, при которых оптимальными являются несколько результирующих показателей: расход энергии и относительная усадка высокоусадочной нити. Для решения этой оптимизационной задачи можно ввести обобщенную функцию желательности, которая учитывает значения всех результирующих показателей [2, 3]:



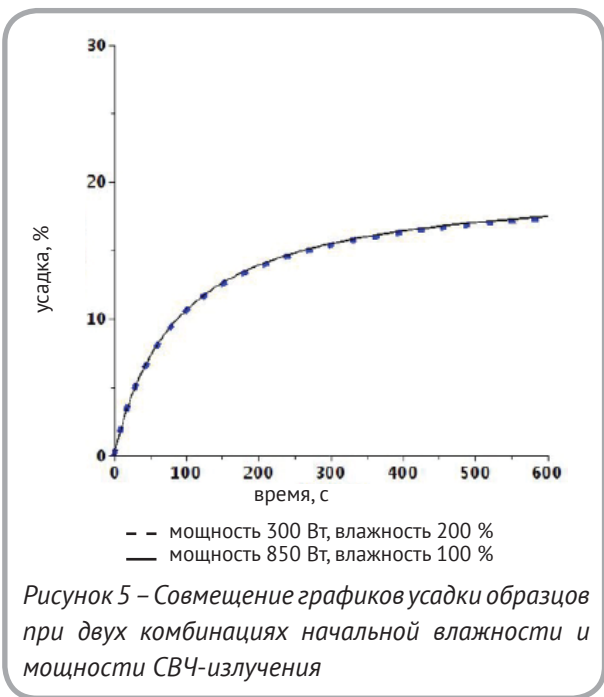
цы измерений и диапазоны значений. При этом значению 0 соответствуют наименее, а 1 – наиболее желательные значения функций  $Y_i$  [3, 4]:

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0, & Y_i < a_i, \\ \left(\frac{Y_i - a_i}{b_i - a_i}\right)^{s_i}, & a_i \leq Y_i \leq b_i, \\ 1, & Y_i > b_i. \end{cases} \quad (3)$$

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 1, & Y_i < a_i, \\ \left(\frac{Y_i - a_i}{b_i - a_i}\right)^{t_i}, & a_i \leq Y_i \leq b_i, \\ 0, & Y_i > b_i. \end{cases} \quad (4)$$

где  $d_i$  – частные функции желательности;  $Y_i$  – результирующие функции;  $a_i, b_i$  – границы интервала желательности;  $s_i, t_i$  – коэффициенты, задающие кривизну линии, соединяющей наиболее и наименее желательные значения на графике функции.

Оптимальными значениями входных параметров будут те значения, при которых достигается максимальное значение обобщенной функции желательности. В качестве нормализующих



функций выбраны функции желательности Дерринжера, которые находятся по формулам (3 – 4). Графики данных функций представлены на рисунке 6 [1, 3, 5].

При построении функций желательности  $d_i$  используются значения границ интервала желательности  $a_i$  и  $b_i$ , результирующего показателя, которые определяются с помощью экспертных оценок [2, 3]. Формула (3) используется в случаях, когда для результирующего показателя наиболее желательными являются максимальные значения (рисунок 6 а). При оптимизации процесса термообработки высокоусадочной нити таким показателем является усадка  $s$ . В качестве нижней границы диапазона желательности взято значение  $s = 0$ , а в качестве верхней границы –  $s = 30$  %. Для получения частной функции желательности для усадки была использована формула (1).

Формулу (4) целесообразно применять, когда для результирующего показателя наиболее желательными являются минимальные значения (рисунок 6 б). При решении задачи оптимизации процесса термообработки высокоусадочной нити в условиях воздействия электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона таким показателем является расход энергии  $E$ . В качестве нижней границы диапазона желательности взято значение  $E = 0$ , а в качестве верхней границы –  $E = 23,6$  Вт · ч. Для получения частной функции желательности для затрат энергии была использована формула [1, 3]

$$E = P \cdot \tau / 3600. \quad (5)$$

Полученные частные функции желательности для усадки  $d_1$  и энергозатрат  $d_2$  были использованы для получения обобщенной функции желательности  $D$  по формуле (2).

На рисунке 7 представлены графики обобщенной функции желательности для трех значений начальной влажности.

Полученная обобщенная функция желательности позволяет для выбранной мощности излучения определить оптимальное время воздействия и наоборот. В результате исследований была получена функция для определения оптимальных комбинаций мощности и времени воз-

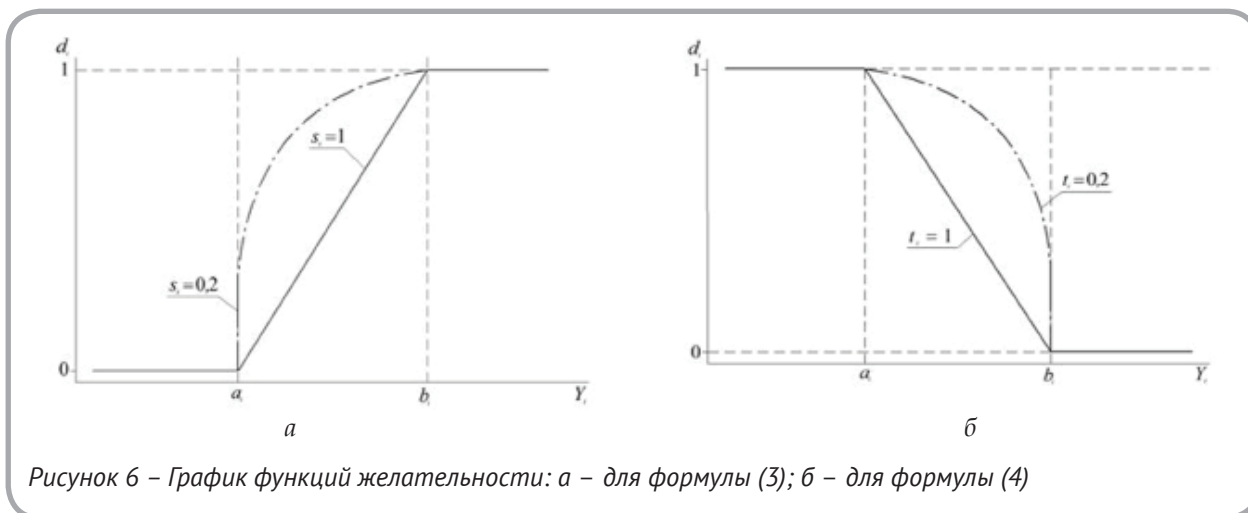


Рисунок 6 – График функций желательности: а – для формулы (3); б – для формулы (4)

действия для различной начальной влажности, представленная формулой (6)

$$\tau = \frac{38700}{P + 116} \quad (6)$$

График функции (6) представлен на рисунке 8.

Получены зависимости для определения энергозатрат, необходимых для достижения заданной усадки, графики которых представлены на рисунке 9.

Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать оптимальные комбинации мощности СВЧ, времени воздействия и начальной влажности высокоусадочной нити для

достижения заданной величины усадки. С использованием этого программного обеспечения был получен набор рекомендуемых параметров процесса термообработки комбинированных высокоусадочных нитей, представленный в таблице 3.

### ВЫВОДЫ

1. С использованием разработанной методики проведения исследований процесса повышения объемности текстильных материалов получена математическая модель зависимости усадки химической высокоусадочной нити от начальной влажности, мощности СВЧ-излучения и времени обработки, позволяющая определять рациональные параметры технологического

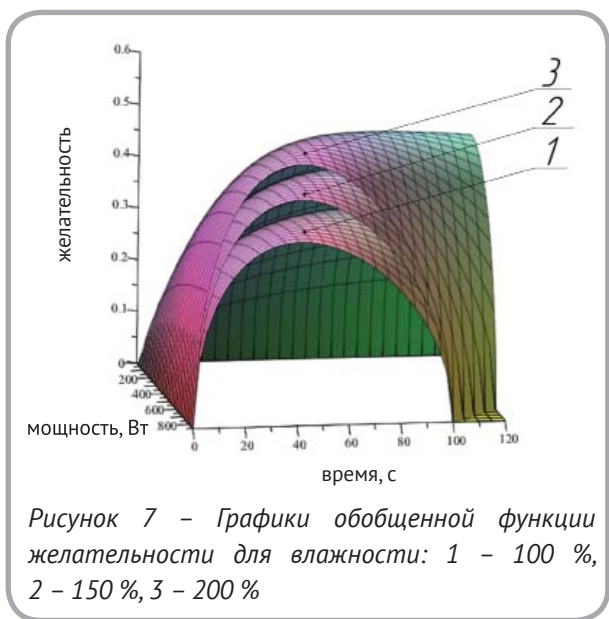


Рисунок 7 – Графики обобщенной функции желательности для влажности: 1 – 100 %, 2 – 150 %, 3 – 200 %

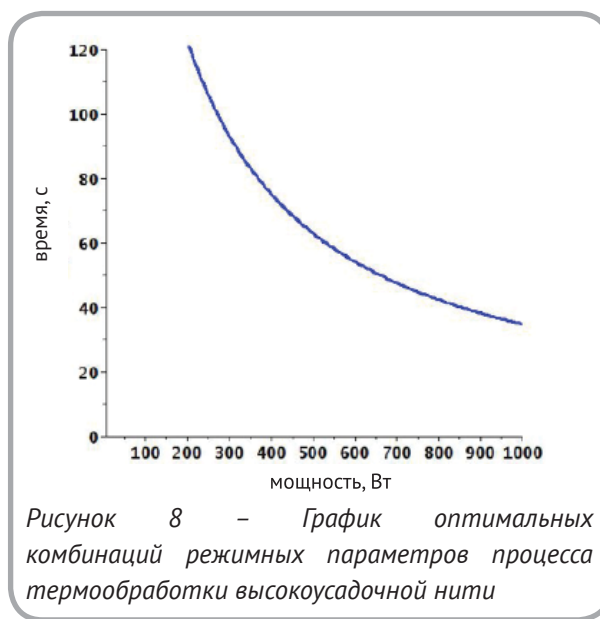


Рисунок 8 – График оптимальных комбинаций режимных параметров процесса термообработки высокоусадочной нити

процесса повышения объемности текстильных материалов.

2. Для комбинированной высокоусадочной нити линейной плотности 30 текс получен набор рекомендуемых параметров процесса термообработки (влажность, мощность излучения, продолжительность воздействия) в условиях СВЧ-нагрева для достижения заданной усадки.

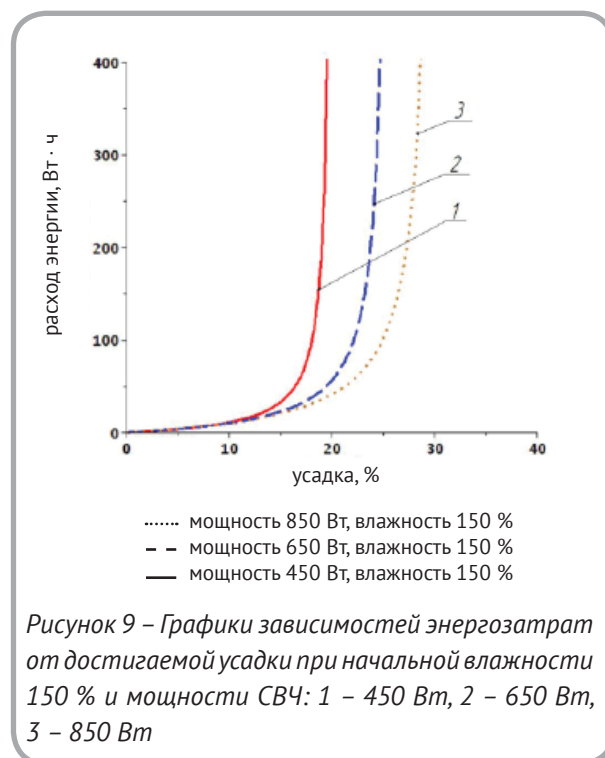


Таблица 3 – Рекомендуемые параметры процесса термообработки комбинированных высокоусадочных нитей в условиях СВЧ-воздействия

Усадка, %	Влажность, %	Мощность, Вт	Время, с
5	100	542	43
5	150	405	32
5	200	333	27
10	100	964	77
10	150	675	54
10	200	538	43
15	100	1469	117
15	150	959	77
15	200	741	59
20	100	2139	170
20	150	1280	102
20	200	954	76
25	100	3101	247
25	150	1658	132
25	200	1188	95
30	100	4653	370
30	150	2121	169
30	200	1451	116
35	100	7592	605
35	150	2709	216
35	200	1753	140

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бизюк, А.Н., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И., Ясинская, Н.Н. (2014), Исследование пропитки текстильных материалов в поле СВЧ-излучения, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, Вып. 26, С. 21–28.
2. Бизюк, А.Н., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И., Ясинская, Н.Н. (2014), Моделирование процесса пропитки текстильных материалов под действием СВЧ-излучения, *Известия вузов. Технология легкой промышленности*, № 1, Санкт-Петербург, 2014, С.16–18.
3. Derringer, G., Suich, D. (1980), *Simultaneous optimization of several response variables*, *Journal of Quality Technology*, 12 (4), 1980, pp. 214–219.
4. Harrington, J. The desirability function, *Industrial Quality Control*, 21 (10), 1965, pp. 494–498.
5. Севостьянов, А.Г., (1980), *Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности*, Москва, 392 с.

## REFERENCES

1. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Ol'shanskii, V.I., Yasinskaya, N.N. (2014), Study of impregnation of textile materials in the field of microwave radiation [Issledovanie propitki tekstil'nyh materialov v pole SVCh izluchenija], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of Vitebsk State Technological University*, Issue 26, Vitebsk, 2014, pp. 21–28.
2. Biziuk, A.N., Zhernosek, S.V., Ol'shanskii, V.I., Yasinskaya, N.N. (2014), Modeling of impregnation of textile materials under the influence of microwave radiation [Modelirovanie processa propitki tekstil'nyh materialov pod dejstviem SVCh izluchenija], *Izvestija vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti – The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, № 1, Saint-Petersburg, 2014, pp.16–18.
3. Derringer, G., Suich, D. (1980), Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12 (4), 1980, pp. 214–219.
4. Harrington, J. The desirability function, *Industrial Quality Control*, 21 (10), 1965, pp. 494–498.
5. Sevost'janov, A.G. (1980), *Metody i sredstva issledovaniya mehaniko-tehnologicheskikh processov tekstil'noj promyshlennosti* [Methods and tools to study mechanical-technological processes of the textile industry], Moscow, 1980, 392 p.

Статья поступила в редакцию 30.10.2014 г.



## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРИЁМОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

В.Т. Голубкова, Е.В. Бондарева

УДК 687.016:004.9

### РЕФЕРАТ

*САПР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ, СТРУКТУРА ОПЕРАЦИИ, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ПРИЕМ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫБОРА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРИЕМОВ, КЛАССИФИКАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ.*

*Объект исследований: технологические операции машинной специальности процессов изготовления изделий различного ассортимента на ОАО «Знамя индустриализации» (г. Витебск). Операции исследовались с точки зрения их структуры и способов получения норм времени на их выполнение.*

*Результаты работы: определены закономерности выбора вспомогательных приемов выполнения технологических операций машинной специальности.*

*Область применения результатов – швейная промышленность.*

*Выводы: формализация установленных закономерностей позволяет проводить выбор вспомогательных приемов в автоматическом режиме, а их корректировку – в интерактивном. Таким образом, процесс проектирования операций может осуществляться с большей степенью автоматизации, чем это предусмотрено в действующих САПР.*

*Решение задачи имеет важное значение как для использования ее в автономном режиме, так и в качестве составной части системы проектирования технологических процессов.*

### ABSTRACT

*TECHNOLOGICAL OPERATION, STRUCTURE OF THE OPERATION, AUXILIARY METHOD, CHOICE REGULARITIES, CLASSIFICATION OF THE OPERATIONS, PLANNING OF THE TECHNOLOGICAL OPERATIONS*

*The object of the investigation is technological operations for making the articles of the different assortment in the OAO ZI (Vitebsk). The structure of the operations and the methods for calculating the time norms were investigated. The regularities of the choice of the auxiliary methods for the realization of the technological operations were defined. The formalization of the defined regularities allows to make the choice of the auxiliary operations in the automatic mode. It allows to organize the process of operations design more automatically.*

В настоящее время в швейном производстве разработаны и внедрены различные системы автоматизированного проектирования (САПР) одежды, отличающиеся структурой и объемом выполняемых проектных процедур, качеством подготовки производства, надежностью, совместимостью с другими системами и т. п. [1–4]. Многие из САПР осуществляют политику

комплексной автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства, то есть имеют в своем составе подсистемы (модули), охватывающие все этапы проектирования изделий, их изготовления, управления производством, объединенные логической связью и средствами обмена информацией. Следует отметить, что разработчиками постоянно совершен-

ствуются функции систем, и в их новых версиях могут присутствовать дополнительные возможности.

Технологическое проектирование, как правило, проходит в интерактивном режиме: специалист вводит необходимые данные, принимает принципиальные решения, решает логические задачи, не поддавшиеся формализации, оценивает полученные результаты, а ЭВМ выполняет технологические процедуры, для которых разработано математическое описание.

Уровень компьютеризации проектных работ в швейном производстве можно было бы считать сегодня достаточно высоким, если не принимать во внимание процессы проектирования структуры технологических операций и их нормирования. Данная задача является наиболее сложной в технологическом проектировании. Здесь большой удельный вес занимают логические рассуждения, до настоящего времени не поддавшиеся формализации и в итоге не имеющие математического описания.

По этой причине во многих известных САПР модуль нормирования технологических операций представлен с невысокой степенью автоматизации либо вообще отсутствует. Как правило, компьютер применяется здесь как средство хранения информации, которую можно быстро извлекать, отображать на экране монитора и синтезировать из нее технологический документ путем выбора необходимых элементов. Такая автоматизация не позволяет достичь желаемого повышения производительности труда технолога и освободить ему время для творческой работы. Необходимо изменить подход к проектированию технологических операций. При этом выбор вспомогательных элементов операций должен осуществляться с большей степенью автоматизации.

Целью настоящей работы является создание базы для минимизации «вмешательства» специалиста в процесс автоматизированного проектирования технологических операций. Объектами исследования стали технологические операции машинной специальности процессов изготовления изделий различного ассортимента на ОАО «Знамя индустриализации» (г. Витебск), а также процесс их нормирования.

Операции исследовались с точки зрения их

структуры и способов получения норм времени на их выполнение. Под структурой технологических операций следует понимать их состав из основных и вспомогательных элементов. Структура операций определяет рациональность процесса их выполнения и, в конечном итоге, – получение технически обоснованных норм времени. Проектирование структуры технологических операций не сводится к их нормированию, но включает его. Это – важный аспект в понимании задачи. Поэтому процессы проектирования структуры операций и их нормирования нельзя разделять. Их следует объединить под названием «Проектирование технологических операций».

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- определение основных элементов технологической операции, из которых следует ее синтезировать;
  - исследование закономерностей выбора основных элементов технологических операций.
- Рассмотрим эти задачи подробнее.

*ЗАДАЧА 1. Определение основных элементов технологической операции, из которых следует ее синтезировать.*

В структуре операции можно выделить следующие составляющие ее части: основная (непосредственно выполнение машинной строчки) и вспомогательная (элементы, направленные на взятие деталей, их взаимную ориентацию, подведение под лапку швейной машины и т.п.). Выполнение вспомогательных элементов создает возможность выполнения основной работы. Вспомогательные элементы могут быть дифференцированы на трудовые движения, трудовые действия, технологические приемы. Анализ организации работ на предприятиях, где используются системы микроэлементов для рационализации трудовых процессов, показал неэффективность разделения операций на трудовые действия и движения. Это обусловлено тем, что и при «ручном», и при автоматизированном проектировании возникают трудности, связанные с управлением большим объемом информации.

Кроме того, анализ методов нормирования технологических операций показал, что расчет

но-аналитический метод наилучшим образом подходит для разработки структуры технологической операции, поскольку предусматривает установление всех вспомогательных элементов операции, как предшествующих выполнению основной ее части, так и следующих за ней.

Таким образом, на основании анализа технологических, организационных параметров операций и критериев выбора вспомогательных элементов принято следующее решение: в качестве основных элементов, из которых следует синтезировать операции, целесообразно принять вспомогательные приемы [5–7]. Использование отраслевых поэлементных нормативов времени на эти приемы должно быть заложено в основу способа автоматизированного проектирования структуры технологических операций. На практике при ручном проектировании для установления технически обоснованных норм времени на операции расчетно-аналитическим методом нормирования используются соответствующие (по видам одежды) сборники отраслевых поэлементных нормативов времени по видам работ и оборудования [8].

Оперативное время на операцию ( $t_{oo}$ ) определяется по формуле

$$t_{oo} = t_{mp} + t_{nep} + t_{нос} + t_{\sigma} + t_{кач}, \quad (1)$$

где  $t_{mp}$  – основное машинно-ручное время на операцию, с;  $t_{nep}$  – время на перехваты, с;  $t_{нос}$  – время на повороты, с;  $t_{\sigma}$  – время на выполнение вспомогательных приемов, с;  $t_{кач}$  – норматив времени на проверку качества, с.

Все составные части оперативного времени, кроме  $t_{\sigma}$ , рассчитываются по известным формулам и вспомогательным таблицам, приведённым в сборниках. В них содержатся также таблицы (справочники) вспомогательных приемов, используемых при работе пачкой, при работе поштучно. Нормативы затрат времени на выполнение приемов дифференцированы в зависимости от габаритов обрабатываемых деталей и вида основного материала. Приведена также группировка деталей по размерам (самая малая деталь, малая, средняя, большая и изделие), а также другая необходимая информация.

Основную трудность в проектировании тех-

нологических операций составляет выбор необходимых вспомогательных приемов.

*ЗАДАЧА 2. Исследование закономерностей выбора основных элементов технологических операций (вспомогательных приемов).*

Получение перечня вспомогательных приёмов выполнения операции, как и многие другие процессы инженерной деятельности, является процессом анализа и переработки информации. Но в настоящее время не существует математически описанной методики выполнения этого этапа проектирования.

На практике технолог использует логическое мышление, накопленный опыт и большой объем информации о выполняемой операции, как то: организация рабочего места, конструктивные параметры соединения, виды швов и строчек, вид применяемых внутривидовых транспортных средств, способ выполнения шва или строчки, применяемые приспособления, состояние предметов труда, способ укладывания полотен в настиле, вид ткани, число и размеры обрабатываемых деталей и др. Выбор решения производится практически из неограниченного множества вариантов. В результате данный процесс является слишком трудоемким и носит субъективный характер. Важно определить перечень сведений, необходимых в каждом случае для принятия решения, а также основные методологические принципы, заложенные в деятельности технолога.

На первом этапе исследования логики технолога проведена систематизация справочной информации, для чего все вспомогательные приемы распределены по блокам и расположены в порядке их выполнения. В каждый блок включен набор приемов, объединенных общей целевой функцией: блок А – взятие деталей и перемещение их в рабочую зону; блок Б – подготовка деталей к обработке (выравнивание срезов, складывание, перегибание и т. п.); В – подведение детали под рабочий орган машины (иглу, лапку); Г – выполнение машинной строчки; Д – подготовка полуфабриката к откладыванию; Е – откладывание готового полуфабриката. Таким образом, сформирован обобщенный справочник вспомогательных приемов, который позволяет сузить круг поиска при выборе приемов на каж-

дом этапе.

Дальнейшие исследования показали, что в процессе выбора вспомогательных приемов имеют место закономерности двух основных видов, которые характеризуют зависимость структуры операции от количества выполняемых в ней строчек и вида выполняемой обработки.

Рассмотрим первый вид закономерностей, определяющих влияние количества строчек в операции на ее структуру. Технологические операции могут состоять из одной или нескольких строчек. Структура процессов выполнения таких строчек имеет как сходство, так и различия. В ходе исследования разработана классификация технологических операций машинной специальности. В зависимости от количества выполняемых в операциях строчек они разделены на следующие классы: одинарные, парные, двойные и полоторные.

Одинарная – операция, в которой выполняется одна строчка. Например, стачивание средних срезов спинки. При выполнении таких операций взятие деталей происходит из одной или двух пачек (в зависимости от способа настиления материалов). В приведенной операции соединяются симметричные детали, поэтому их берут из одной пачки при настилении лицом к лицу, а при настилении лицом вниз – из двух пачек. Набор вспомогательных приемов для операций этого вида представляет собой наиболее простой вариант (назовем его «базовый набор»). Число приёмов на операцию зависит от числа деталей в пачке ( $m$ ). В таблице 1 представлен пример структуры одинарной операции.

К полоторным отнесены операции, состоящие из двух строчек, при этом вторая строчка выполняется после перемещения полуфабриката к другому участку работы, а в результате выполнения обеих строчек образуется один полуфабрикат. При выполнении данной операции взятие деталей происходит из двух либо трех пачек (в зависимости от способа настиления материала). В таблице 2 представлен пример структуры полоторной операции.

Из сопоставления таблиц видно, что для полоторных операций имеют место следующие закономерности:

1. Основной состав вспомогательных приемов аналогичен базовому составу одинарной

операции. Отличие состоит в том, что количество выполняемых приемов увеличивается в 2 раза, кроме приемов по выведению деталей из рабочей зоны (приемы 118, 3, 17 а), поскольку обработанные полуфабрикаты укладывают в одну пачку.

2. Кроме базового набора необходимо выполнение приемов, специфичных для этого вида операций (приемы 30, 141).

Парными названы операции, в которых выполняется две строчки на правой и левой частях изделия, и эти части после завершения операции остаются несоединенными между собой. Взятие деталей (полуфабриката) происходит из двух либо четырёх пачек (в зависимости от способа настиления материала). Пример: стачивание рельефных срезов деталей переда, локтевых и передних срезов рукавов.

Такие операции выполняются как две одинарные. Для них установлена следующая закономерность. Для парных операций корректировка базового набора приёмов состоит в том, что их количество, начиная со взятия пачки и заканчивая откладыванием полуфабриката, увеличивается в 2 раза, кроме приема «записать работу». Готовые полуфабрикаты складываются в одну пачку, следовательно, происходит связывание и откладывание одной пачки.

В двойной операции выполняется две строчки на одном полуфабрикате (детали). Взятие полуфабриката происходит из одной пачки. Пример: стачивание вытачек на спинке; выполнение отделочных строчек по рельефным швам спинки. Для двойных операций в 2 раза увеличивается число приемов, начиная с подготовки деталей к обработке (сложить плечевую вытачку) и заканчивая подготовкой детали к откладыванию (вынуть деталь из под лапки). Добавляется прием «переместить полуфабрикат к другому участку работы». Все вспомогательные приемы по взятию и откладыванию полуфабриката соответствуют базовому набору.

Таким образом, можно сделать главный вывод исследований: используя установленные закономерности, проектирование структуры технологических операций любого класса можно проводить в 2 этапа:

1-й этап: проектирование набора вспомогательных приемов в автоматическом режиме с

Таблица 1 – Структура одинарной операции «Стачать средние срезы спинки»

Номер приема	Содержание вспомогательного приема	Число приемов на операцию
Базовый набор		
4	Взять пачку деталей и положить на стол или довести до места работы	1/м
11	Записать работу	1/м
28	Развязать пачку деталей	1/м
416	Взять деталь, довести до места работы: с междустволья, кронштейна или из пачки со стола (две)	1
185 (1)	Сложить две детали для машинных и ручных работ (время брать по меньшей детали)	1
152а	Подвести под лапку край детали при наличии направляющей линейки	1
Стачать средние срезы спинки (основная часть операции)		
82е	Вынуть деталь из-под лапки, оттягивая или обрывая нитки	1
118	Отложить деталь или несколько деталей, сложенных вместе	1
3	Взять тесьму и связать пачку деталей	1/м
17а	Отложить пачку деталей	1/м

Таблица 2 – Структура полуторной операции «Стачать рельефные срезы спинки»

Номер приема	Содержание вспомогательного приема	Число приемов на операцию
Базовый набор		
4	Взять пачку деталей и положить на стол или довести до места работы	2/м
11	Записать работу	1/м
28	Развязать пачку деталей	2/м
416	Взять деталь, довести до места работы: с междустволья, кронштейна или из пачки со стола (две)	2
185 (1)	Сложить две детали для машинных и ручных работ (время брать по меньшей детали)	2
152а	Подвести под лапку край детали при наличии направляющей линейки	2
Стачать рельефные срезы спинки		
82е	Вынуть деталь из-под лапки, оттягивая или обрывая нитки	2
118	Отложить деталь или несколько деталей, сложенных вместе	1
3	Взять тесьму и связать пачку деталей	1/м
17а	Отложить пачку деталей	1/м
Дополнительные приемы		
30	Разложить на рабочем месте отдельные пачки деталей	2/м
141	Переместить изделие к другому участку работы, расправляя обрабатываемый участок	1

учетом класса операции;

2-й этап: корректировка набора вспомогательных приемов в интерактивном режиме с учетом индивидуальных особенностей операции (если этих особенностей, этап отсутствует).

Следует отметить, что изложенные закономерности справедливы для операций различных классов, в которых предусматривается соединение срезов деталей. Фактически при изготовлении швейных изделий имеют место операции, в которых выполняются другие виды соединения и обработки.

Для изучения закономерностей второго вида, определяющих зависимость структуры операции от вида выполняемой в ней обработки, предложена следующая классификация видов обработки (соединения):

- соединение срезов (боковых, плечевых и т. п.);
- соединение среза с поверхностью (соединение деталей карманов с деталями переда, шлевок с рукавами и т. п.);
- обработка поверхности (стачивание вытачек, прокладывание строчек и т. п.);
- обработка среза (обметывание, окантовывание, подгиб).

Закономерности изучены на примерах одинарных операций. Сравнение структуры одинарных операций с различными видами обработки показывает, что она (структура) имеет отличия в перечне вспомогательных приемов, которое состоит в способах подготовки деталей к обработке (приемы блока Б).

В операциях по соединению срезов из этого блока могут использоваться приемы по вкладыванию мелких деталей (прием 65) и подгибанию обрезных краёв деталей (прием 167); при соединении среза с поверхностью при необходимости выбирается прием 159 «Подогнуть (перегнуть)...».

При обработке среза всегда обрабатывается одна деталь (полуфабрикат), следовательно, переносить в рабочую зону необходимо только одну пачку. Выбор приемов для подготовки деталей к обработке зависит от конструкции применяемого шва: для шва вподгибку выбираются соответствующие приемы по подгибанию одинарным или двойным подгибом (приемы 159 или 160). При окантовывании среза выбираются

приёмы, соответствующие спецприспособлению: взятие катушки с бейкой (прием 2) и заправка конца детали в направитель (прием 12).

При обработке поверхности так же, как и при обработке срезов, в рабочую зону переносится одна пачка. Для подготовки деталей к обработке выбираются приемы: закладывание складок, зашипов (прием 93), складывание вытачек (прием 184). При выполнении отделочных строчек вспомогательные приемы для подготовки детали к обработке не требуются.

Изложенные закономерности являются общими не для всех операций одного вида, а лишь для определенных групп операций. В связи с этим их использование возможно лишь в интерактивном режиме.

На основании изучения влияния вида обработки (соединения) на структуру операций главный вывод наших исследований необходимо уточнить, отметив, что для автоматизированного проектирования структуры технологических операций необходимо выполнение еще одного (третьего) этапа, состоящего в корректировке набора вспомогательных приемов с учетом вида обработки (соединения), что должно выполняться также в интерактивном режиме.

Для организации диалога (интерактивного режима) в ранее выполненных работах авторами предложено использовать метод ситуационного моделирования теории принятия решений [2].

В соответствии с ним процесс логического мышления технолога можно представить в нашем случае как многоуровневый интеграционный процесс последовательной детализации проектных решений. На каждом этапе, анализируя значения одного из выбранных признаков, технолог исключает неприемлемые решения, принимает лишь одно, характерное для данной ситуации. В такой постановке задача формального описания процесса выбора вспомогательных приемов сводится к установлению перечня признаков для анализа операций, возможных их значений и последовательности их анализа.

Полученные результаты задают направление дальнейших исследований: выявление закономерностей выбора вспомогательных приемов для других классов и видов операций, их формализация, организация диалога и алгоритмизация

процесса проектирования технологических операций. Решение задачи имеет важное значение как для использования ее в автономном режиме, так и в качестве составной части системы проектирования технологических процессов.

Авторы выражают благодарность руководству ОАО «Знамя индустриализации» (г. Витебск): заместителю директора Беляевой Л.С. и начальнику технического отдела Жаворонок Ж.И. за предоставление необходимого материала и помощь в организации исследований.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. (2003), Автоматизированное проектирование технологии изготовления швейных изделий в «Eleandr САПР» [Электронный ресурс] Швейная промышленность № 1, С. 34. Режим доступа: <http://eleandr-soft.ru/technol.htm/> 15.04.2014
2. Сурикова, Г.И., Сурикова, О.В., Кузьмичёв, В.Е. (2007), Уникальные возможности САПР «ГРАЦИЯ» во внедрении новых компьютерных технологий проектирования одежды, *Швейная промышленность*, 2007, № 6, С. 51 – 52.
3. Доможирова, Л.Ю., Карамышева, Н.А. К вопросу определения нормативов. *Швейная промышленность*, 2010, № 1, С.46 – 48.
4. АвтоКрой САПР [Электронный ресурс] Научно-производственное предприятие
5. «Лакшми». - Минск, 2006. Режим доступа: [http://autokroy.com /](http://autokroy.com/) 15.04.2014
6. Генкин, Б.М. (2003), *Организация, нормирование и оплата труда на промышленных предприятиях*. Москва, НОРМА, 213 с.
7. Grafis САПР [Электронный ресурс] «НТЦ дизайна и технологий» - Москва, 2000. Режим доступа: [http://eleandr-soft.ru/grafis.htm /](http://eleandr-soft.ru/grafis.htm/) 15.04.2014

#### REFERENCES

1. (2003), Avtomatizirovannoe proektirovanie tehnologii izgotovlenija shvejnyh izdelij v «Eleandr SAPR» [Computer-aided design technology in the manufacture of apparel in « Eleandr CAD System»] available at: <http://eleandr-soft.ru/technol.htm/> 15.04.2014
2. Surikova, G.I., Surikova, O.V., Kuz'michjov, V.E. (2007), The unique capabilities of CAD System «GRAZIA» in the introduction of new computer technologies designing clothes [Unikal'nye vozmozhnosti SAPR «GRACIJA» vo vnedrenii novyh komp'juternyh tehnologij proektirovanija odezhdy]. *Sewing Industry*, 2007, № 6, pp. 51 – 52.
3. Domozhirova, L.Ju., Karamysheva, N.A. (2010), On the determination of norms. [K voprosu opredelenija normativov. Shvejnjaja promyshlennost']. *Sewing Industry*, 2010, № 1, pp. 46 – 48.
4. AvtoKroj SAPR [Control System AutoKroy] Available at: [http://autokroy.com /](http://autokroy.com/) 15.04.2014
5. «Lakshmi». - Minsk, 2006 : [http://autokroy.com /](http://autokroy.com/) 15.04.2014
6. Genkin, B.M. *Organizacija, normirovanie i oplata truda na promyshlennyh predpriyatijah*. [Organization, regulation and wages in industrial enterprises]. Moscow, NORMA, 213p.

8. Железнякова, Т.А., Мурыгин, В. Е., Ильина, Т. А. (2006), Проектирование структур технологических операций [Электронный ресурс] Швейная промышленность, № 3. Режим доступа: <http://t-stile.info/proektirovanie-struktur-technologicheskix-operacij/> / 15.04.2014
9. Отраслевые поэлементные нормативы времени по видам работ и оборудования при пошиве верхней одежды – Минск : ЦНИИТЭИлегпром, 2008, 296 с.
10. Голубкова, В. Т., Касаева, Т.В., Семиглазова, М.В. Применение метода ситуационного моделирования для автоматизированного проектирования технологических операций, Совершенствование технологических процессов, оборудования и организации производства в легкой промышленности, *сборник статей. В 2 ч.* Минск, 1994. – Ч. 1. – С. 102-105
7. Grafis SAPR [Grafis CAD System] Available at: <http://eleandr-soft.ru/grafis.htm> / 15.04.2014
8. Proektirovanie struktur tehnologicheskij operacij [Designing structures technological operations], available at:<http://t-stile.info/proektirovanie-struktur-texnologicheskij-operacij/> / 15.04.2014
9. Otrasleyve pojelementnye normativy vremeni po vidam rabot i oborudovanija pri poshive verhnej odezhdy [Industry standards elementwise time by type of work and equipment for sewing outerwear]. Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut informacii i tehniko-jekonomicheskij issledovanij legkoj promyshlennosti – Central Research Institute of Information and Feasibility Study of Light Industry, 2008. 296 p.
10. Golubkova, V.T., Kasaeva, T.V., Semiglazova, M.V. (1994), Application of the method of situational modeling for computer-aided design technology operations [Primenenie metoda situacionnogo modelirovanija dlja avtomatizirovannogo proektirovanija tehnologicheskij operacij], *Improvement of technological processes, equipment and organization of production in light industry.* Vitebskij Tehnologicheskij Institut Legkoj Promyshlennosti – Vitebsk, 1994. pp. 102–105.

Статья поступила в редакцию 16. 04. 2014 г.



## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПРИЖИМНОЙ ЛАПКИ ВЫШИВАЛЬНОГО ПОЛУАВТОМАТА

Д.В. Грот, Б.С. Сункуев, А.Г. Кириллов

УДК 687.053.1/.5

### РЕФЕРАТ

*ВЫШИВАЛЬНЫЙ ПОЛУАВТОМАТ, КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ПРИЖИМНАЯ ЛАПКА*

*Цель работы – аналитическое исследование механизма прижимной лапки полуавтомата многоцветной вышивки. Предметом исследования является механизм подвижной лапки полуавтомата с упругой связью между звеньями.*

*Составлены уравнения кинематики подвижной лапки с учетом влияния упругой связи. Для уравнений кинематики разработан алгоритм программного расчета, в соответствии с которым в среде Delphi составлена программа кинематического анализа механизма.*

*По разработанной программе выполнены кинематические исследования движения подвижной лапки полуавтомата многоцветной вышивки, разработанного кафедрой машин и аппаратов легкой промышленности УО «ВГТУ» совместно с ОАО «НП ОКБМ» г. Витебска. Установлено, что в ходе шитья обнаруживается незначительный отрыв подвижной лапки от источника движения, что не создает ухудшающих условий для процесса шитья.*

*Предложенные методика расчета и программное обеспечение рекомендуются к применению при оценке работы механизмов подвижных лапок вышивальных полуавтоматов.*

### ABSTRACT

*SEMI-AUTOMATIC, MULTICOLOR, MACHINE EMBROIDERY, PRESSER FOOT, KINEMATIC ANALYSIS*

*In semiautomatic mechanism used mobile presser foot with elastic coupling between the links. This paper presents the results of the kinematic analysis of a mechanism to assess the impact of elastic coupling on the law of motion of the driven member.*

*El staff «VSTU» and OPC «NP OKBM» designed semiautomatic multicolor embroidery on leather.*

*Compiled equations kinematics mobile foot with the influence of elastic coupling.*

*On the developed program of research carried out kinematic motion of the moving foot semiautomatic multicolor embroidery developed by the Department of machines and apparatus of light industry EI «VSTU» in conjunction with «NP OKBM» Vitebsk.*

*It was established that during the sewing detected light mobile take off foot traffic from the source that does not create worsening conditions for the sewing process.*

Сотрудниками УО «ВГТУ» и ОАО «НП ОКБМ» разработан полуавтомат многоцветной вышивки на изделиях из кожи [1]. В полуавтомате использован механизм подвижной прижимной лапки изменяемой структуры с упругой связью между звеньями. Вопросы анализа и синтеза подобных механизмов в специальной литературе практически не рассматривались. Известные работы [2] посвящены, главным образом, исследованию кинематики волновых передач и механизмов схватов роботов и манипуляторов. В настоящей работе рассмотрена методика численного анализа

кинематики механизма подвижной прижимной лапки с использованием известных положений теории механизмов и теории колебаний. Цель работы – оценить влияние упругой связи на выполняемую прижимной лапкой технологическую функцию.

Схема механизма показана на рисунке 1. Ползун 2 получает движение от кривошипа АВ через шатун ВС. Прижимная лапка 3 прижимается к ползуну пружинной 1. Представим механизм в виде системы, состоящей из двух звеньев – ползуна 2, совершающего движение по закону,

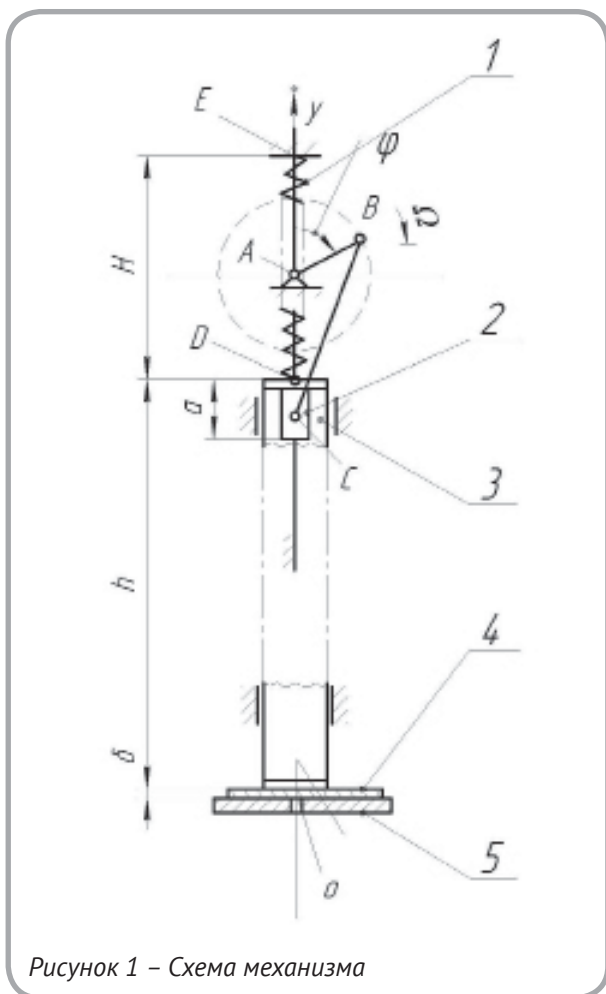


Рисунок 1 – Схема механизма

определяемому размерами кривошипно-ползунного механизма  $ABC$  и прижимной лапки 3, совершающей движение под действием ползуна 2, пружины 1 и поверхности сшиваемого материала 4, играющей роль ограничителя. Угловую координату  $\varphi$  кривошипа  $AB$  будем отсчитывать по часовой стрелке от оси  $Oy$  с началом 0, расположенным на поверхности игольной пластины 5.

Положение ползуна 2 будем определять координатой  $y_1$  точки, совпадающей с точкой  $D$  контакта пружины 1 с поверхностью прижимной лапки. Координата  $y_1$  определяется из формулы

$$y_1 = y_A + r \cdot \cos \varphi \sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \varphi)^2} + a, \quad (1)$$

где  $a$  – расстояние между центром шарнира  $C$  и  $D$ ,  $r = AB$ ,  $L = BC$ .

Положение прижимной лапки 3 будем определять координатой  $y_2$  точки  $D$  контакта с пружиной 1.

Без учёта динамики системы графики зависимостей  $y_1$  и  $y_2$  от  $\varphi$  могут быть представлены соответственно в виде кривых I и II (рисунок 2 а). На участках  $ab$  и  $da$  кривые I и II совпадают: прижимная лапка 3 и ползун 1 движутся совместно. На участке  $bd$  прижимная лапка неподвижна и прижимает сшиваемый материал 4 к игольной пластине 5, а ползун 3 движется вниз до точки  $c$  и возвращается в положение с координатой  $y_1 = h$ , где  $h$  – высота прижимной лапки 3 (рис. 1).

На рисунке 2 б представлены графики зависимостей скоростей  $V_1$  и  $V_2$  ползуна 2 и прижимной лапки 3 соответственно в виде кривых I и II.

Рассмотрим закон движения прижимной лапки 3 на участке  $da$  (рис. 2 а). В начале участка ползун 2 движется со скоростью

$$V_2 = (-r \cdot \sin \varphi + \frac{r^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \varphi)^2}}) \cdot \Omega, \quad (2)$$

где  $\Omega$  – угловая скорость кривошипа  $AB$ ,  $\varphi = \varphi_a$ .

Уравнение (2) получено дифференцированием уравнения (1) по времени  $t$ . Лапка 3 в этот момент неподвижна. Таким образом, имеет место ударное взаимодействие ползуна 2 и прижимной лапки 3. Начиная с этого момента движение прижимной лапки 3 может быть представлено в виде уравнения

$$y_2 = \begin{cases} A \cdot e^{-ct} \cdot \sin(\omega \cdot t + a) + h_0, & \text{если } y_2 > y_1; \\ y_1, & \text{если } y_2 \leq y_1. \end{cases} \quad (3)$$

Верхняя часть правой части уравнения (3) выражает свободные колебания прижимной лапки, где  $A$  – амплитуда свободных колебаний, м;  $c = 0,012 \omega_0$ ,  $c^{-1}$ ;  $\omega_0 = \sqrt{I / m \cdot \lambda_n}$ ,  $c^{-1}$ ;  $m$  – масса прижимной лапки, 3 кг;  $\lambda_n$  – осевая податливость пружины 1, м/Н;  $\omega_0$  – круговая частота собственных колебаний прижимной лапки 3,  $c^{-1}$ ;  $\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - c^2}$ ;  $a$  – начальная фаза свободных колебаний прижимной лапки 3, рад;  $h_0$  – координата точки  $D$  пружины 1, находящейся в свободном состоянии, м;  $h_0 = y_e - H_0$ ;  $H_0$  – длина пружины 1 в свободном состоянии.

Величину  $V_0$  определим из следующих соображений. При  $t = 0$  имеет место ударное взаимодействие ползуна 3 и прижимной лапки 2. Согласно [3, с. 392], если движущееся тело (ползун

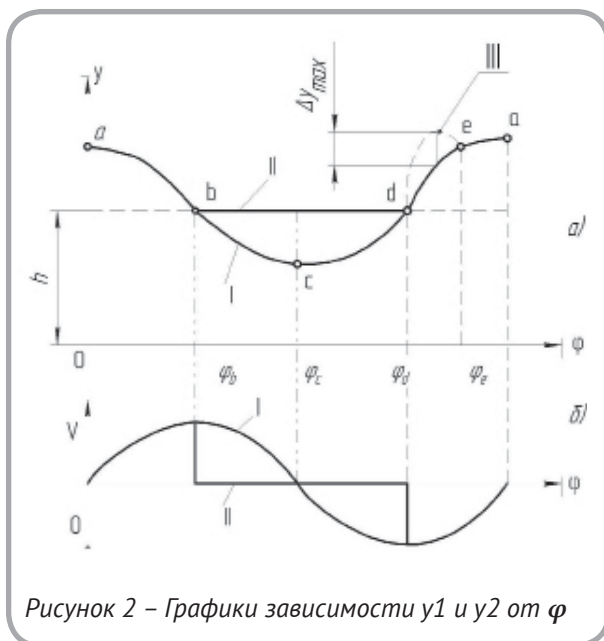


Рисунок 2 – Графики зависимости  $y_1$  и  $y_2$  от  $\varphi$

3) имеющее массу  $m_2$  и скорость  $V_2$ , ударяет в неподвижное тело (прижимную лапку 2) массы  $m$ , то конечная скорость после удара  $V_0$  (общая для обоих тел) может быть определена из соотношения

$$V_0 = V_1 \cdot \frac{m + m_2}{m_2}$$

За массу  $m_2$  примем сумму приведенных к ползуну 2 масс: ползуна  $m_{II}$ , шатуна  $m_{III}$  кривошипа  $m_K$  и связанных с ним главного вала и звеньев привода:  $m_2 = m_{II} + m_{III} + m_K$ . Так как  $m_2$  значительно больше  $m$ , то  $V_0 \approx V_2$  (формула 2).

Для определения постоянных  $A$  и  $a$  в уравнении (3) рассмотрим начальные условия:  $t = 0$ ;  $y_2 = y_0 = y_1 - h_0$ ;  $d \cdot y_1 / d \cdot t = V_0$ . Подставив эти условия в (3), определим:

$$y_0 = A \cdot \sin a; \tag{4}$$

$$V_0 = c \cdot A \cdot \sin a + A \cdot \omega \cdot \cos a. \tag{5}$$

Решая приведённую систему уравнений, определим:

$$A = \frac{y_0}{\sin a}; \tag{6}$$

$$a = \arctg \frac{\omega}{\frac{V_0}{y_0} + c}. \tag{7}$$

Нижняя часть уравнения (3) выражает совместное движение прижимной лапки 3 и ползуна 2. С учётом изложенного анализ движения прижимной лапки 3 может быть выполнен численным методом. Ниже предоставлена блок-схема алгоритма.

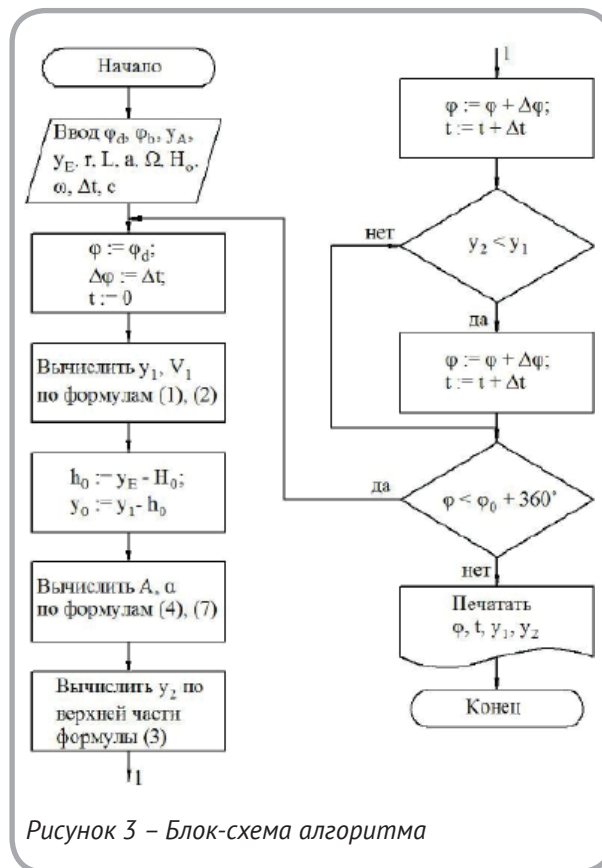


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма

По приведённому алгоритму составлена программа расчёта положений ползуна 2 и прижимной лапки 3 на интервале  $[\varphi_a, \varphi_b]$  значений  $\varphi$  по этой программе выполнены расчёты  $y_1$  и  $y_2$  для механизма прижимной лапки полуавтомата многоцветной вышивки на изделиях из кожи при следующих исходных данных:  $\varphi_a = 273^\circ$ ;  $\varphi_b = 84^\circ$ ;  $y_A = 160$  мм;  $y_E = 187$  мм;  $r = 17,5$  мм;  $L = 42$  мм;  $a = 8$  мм;  $\Omega = 100$  рад/с;  $c = 0,012 \varphi_0$ . Расчёты выполнены для пружин, спроектированных по методике, изложенной в [4] при различных требуемых усилиях прижатия изделий из кожи.

На рисунке 2 а в виде пунктирной линии III показан график пути  $y_2$  прижимной лапки 3, соответствующий  $[\varphi_a, \varphi_e]$  углов  $\varphi$ , на котором имеет место нарушение контакта ползуна 2 и прижимной лапки 3. На интервале  $[\varphi_a, \varphi_b]$

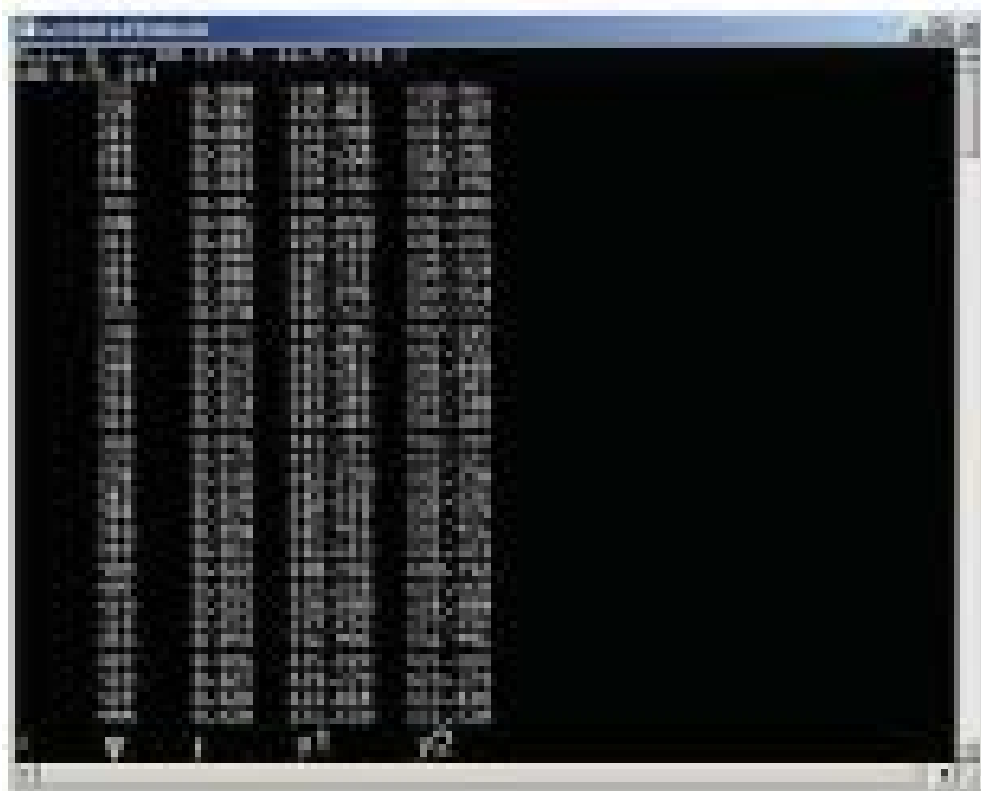


Рисунок 4 – Образец распечатки результатов расчётов  $y_1$  и  $y_2$

нарушение контакта ползуна 2 и прижимной лапки не наблюдается. Величину максимального расхождения графиков  $y_1$  и  $y_2$  на интервале  $[\varphi_d, \varphi_e]$  обозначим  $\Delta y_{max}$ .

На рисунке 4 приведен образец распечатки результатов расчётов  $y_1$  и  $y_2$ , а на рисунке 5 – графики зависимостей  $y_1 = f(t)$  и  $y_2 = f(t)$ , полученные на ЭВМ для пружины с диаметром проволоки  $d = 0,68$  мм. Результаты расчётов для пружины с другими параметрами, спроектированных по методике, изложенной в [4], сведены в таблицу.

Из таблицы следует, что для всех пружин интервалы значений  $\varphi$ , в которых имеется нарушение контакта прижимной лапки 3 и ползуна 2, находятся в пределах  $\varphi = 278^\circ \dots 358^\circ$ , а величина расхождения  $\Delta y_{max} \leq 6,3$  мм. Подобный закон движения прижимной лапки 3 не вызывает нарушения процесса шитья, так как на участке  $bd$  (рисунок 2 а) прижимная лапка контролирует сшиваемый материал.

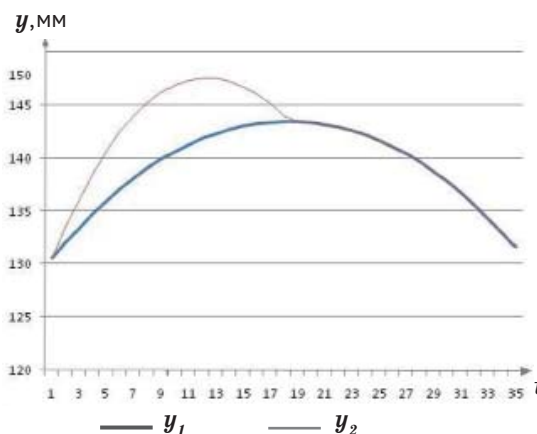


Рисунок 5 – Графики зависимостей  $y_1 = f(t)$  и  $y_2 = f(t)$

#### Выводы

Предложена методика и алгоритм численного анализа кинематики механизма прижимной лапки.

С использованием этой методики проведен

Таблица 1 – Результаты расчётов для пружины с другими параметрами

№	$d$ , мм	$\varphi_d$ , °	$\varphi_e$ , °	$\Delta y_{max}$ , мм
1	0,32	278	353	6,010
2	0,41	278	358	6,190
3	0,47	278	358	6,231
4	0,52	278	358	6,244
5	0,56	278	358	6,251
6	0,59	278	358	6,254
7	0,63	278	358	6,256
8	0,65	278	358	6,257
9	0,68	278	358	6,306
10	0,71	278	358	6,259
11	0,73	278	358	6,260
12	0,75	278	358	6,260
13	0,77	278	358	6,260
14	0,79	278	358	6,261
15	0,81	278	358	6,261
16	0,83	278	358	6,261
17	0,85	278	358	6,261
18	0,87	278	358	6,050
19	0,88	278	358	6,262

анализ кинематики механизма прижимной лапки вышивального полуавтомата для различных пружин.

Установлено, что имеет место нарушение контакта ведомого звена механизма с ползуном кривошипно-ползунного механизма, которое не приводит к нарушению выполняемой технологической функции. Предложенная методика может быть использована при проектировании аналогичных механизмов переменной структуры с упругой связью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сункуев, Б.С., Бувевич, А.Э., Бувевич, Т.В., Грот, Д.В., Раков, В.А., Шнейвайс, И.Л., Ткачѳв, Ю.Л., (2011), Новое в технике и технологии текстильной и лёгкой промышленности, *Материалы международной научной конференции*, Витебск, 2011, С 290.
2. Добролюбов, А.И., (1984), *Механизмы на гибких и упругих элементах*, Минск, 117 с.
3. Тимошенко, С.П., (1959), *Колебания в инженерном деле*, Москва, 439 с.
4. Грот, Д.В., Кириллов, А.Г., Сункуев, Б.С. (2013), Проектный расчёт пружины механизма подвижной прижимной лапки многоигольного вышивального полуавтомата, *Висник Київського національного університету технологій та дизайну*, 2013, № 3, С 192.

REFERENCES

1. Sunkuev, B.S. Semi-automatic multi-color embroidery on leather / B.S. Sunkuev, A.E. Buevich, T.V. Buevich, D.V. Grot, V.A. Rakov, I.L. Shneyvays, J.L. Tkachev / *New in equipment and technology for textile and light industry: proceedings of the international scientific conference. Vitebsk, in November 2011. In 24.4.2 / UO "VSTU."* – Vitebsk, 2011 – 290 p.
2. Dobrolybov, A.I. Mechanisms for flexible and elastic elements / Ed., E.A. Starodetko. – Mn.: Science and Technology, 1984 -117 p., il.
3. Timoshenko, S.P. Fluctuations in engineering: a tutorial / S.P. Timoshenko. - Moscow: Fizmatchiz, 1959. – 439 p.
4. Grot, D.V. Project calculation of the spring mechanism of the mobile multi-needle embroidery presser foot semiautomatic / D.V. Grot, A.G. Kirillov, B.S. Sunkuev // *Bulletin of Kiev National University of Technology and Design. Number 3, 2013. / KNUTD - Kiev, 2013 – 192 p.*

Статья поступила в редакцию 24. 04. 2014 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЛОРУССКОГО ДЛИННОГО ТРЕПАНОГО ЛЬНОВОЛОКНА УРОЖАЯ 2013 ГОДА

А.С. Дягилев, А.Н. Бизюк, А.Г. Коган

УДК 677.11.017.2/.7

### РЕФЕРАТ

*ДЛИННОЕ ТРЕПАНОЕ ЛЬНОВОЛОКНО, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ПРЯДИЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ, ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА*

*Статья посвящена исследованию характеристик белорусского длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года. Приведены результаты лабораторного исследования разрывной нагрузки, горстевой длины, гибкости, группы цвета длинного трепаного льноволокна. Проведен регрессионный анализ зависимости физико-механических свойств от номера длинного трепаного льноволокна. С помощью информационной системы контроля качества РУПТП «Оршанский льнокомбинат» проведен сравнительный анализ качественных характеристик длинного трепаного льноволокна различных регионов Республики Беларусь с использованием суммы процентно-номеров и средневзвешенного номера.*

*Приведенные регрессионные модели, установленные взаимосвязи между качественными характеристиками и регионами поставки могут быть использованы для сравнительной оценки качества белорусского длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года с качеством льноволокна другого происхождения.*

### ABSTRACT

*LONG SCUTCHED FLAX, QUALITY CONTROL, SPINNING ABILITY, INFORMATION SYSTEM OF QUALITY CONTROL*

*The article investigates the characteristics of the Belarusian long scutched flax harvested in 2013. The results of laboratory studies of the breaking load, length, flexibility, color group of long scutched flax are shown. A regression analysis of the dependence of physical and mechanical properties on the number of long scutched flax have been conducted. With the help of the information system of quality control of the «Orsha Linen Mill» RUPTE comparative analysis of the qualitative characteristics of long scutched flax from various regions of the Republic of Belarus with use of the sum of percent-numbers and the weighted average rate have been conducted.*

*Specified regression models, obtained relationships between the quality characteristics and the regions of supply can be used to compare the quality of the Belarusian long scutched flax harvested in 2013 with quality of flax fibers of different origin.*

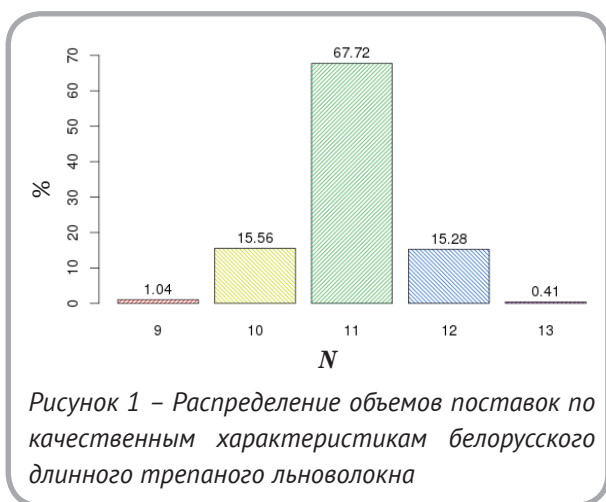
Сотрудниками Витебского государственного технологического университета совместно со специалистами РУПТП «Оршанский льнокомбинат» разработана и внедрена в производственный процесс информационная система контроля качества поставляемого на комбинат длинного трепаного льноволокна «TexLab» [1, 2], что соответствует современным направлениям в развитии систем управления качеством на предприятиях текстильной промышленности [3]. РУПТП «Оршанский льнокомбинат» является системообразующим предприятием льноперерабатывающей отрасли Республики Беларусь и

основным переработчиком длинного трепаного льноволокна, производимого в республике. В связи с этим данные, накапливаемые в системе, могут характеризовать в целом длинное трепаное льноволокно, производимое льнозаводами Республики Беларусь. В настоящей работе приведены данные об исследованиях физико-механических свойств и оценке прядильной способности длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года, проведенных в лаборатории входного контроля РУПТП «Оршанский льнокомбинат» в период с января по октябрь 2014 года, и не отражают объемы закупок льноволокна, так как

включают в себя также данные о партиях волокна с рекламацией по качеству. Приведенные в работе оценки качества льноволокна получены с помощью разработанной информационной системы контроля качества «TexLab» на основе данных лабораторного исследования их физико-механических свойств.

Согласно действующим техническим нормативным правовым актам [4, 5] показатель качества (прядельной способности) длинного трепаного льноволокна устанавливается в соответствии с результатами комплексного лабораторного исследования его физико-механических свойств: разрывной нагрузки, горстевой длины, гибкости, группы цвета, закростренности, недоработки и влажности. Числовой показатель качества длинного трепаного волокна может находиться в диапазоне от 8 до 24 и называется номером.

На рисунке 1 приведено распределение объемов поставок по качественным характеристикам длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года.



Из рисунка 1 видно преобладание в общем объеме поставок длинного трепаного льноволокна 11 номера. Доля льноволокна 13 номера составляет меньше процента, льноволокно 14 и более высоких номеров белорусскими льнозаводами не поставлялось на льнокомбинат. В результате исследования при входном контроле качества физико-механических свойств длинного трепаного льноволокна выявляются случаи несоответствия измеренных качественных характеристик характеристикам, заявленным по-

ставщиком. В связи с этим в базе данных фиксируется информация о поставках льноволокна 9 номера, которое не закупается комбинатом, так как не обладает требуемой прядельной способностью.

На рисунке 2 приведено распределение объемов поставок по качественным характеристикам длинного трепаного льноволокна для различных регионов Беларуси.

Как видно из рисунка 2, распределение объемов поставок по качественным характеристикам, приведенное на рисунке 1, в целом характерно и для отдельных регионов Республики Беларусь. При этом Гродненская, Минская и Гомельская области занимают первые места по доле 12, 11 и 10 номеров.

На рисунках 3 – 6 приведены графические зависимости средних, минимальных и максимальных значений разрывной нагрузки, горстевой длины, гибкости, группы цвета длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года от номера.

Как видно из рисунков 3 – 6 средние значения разрывной нагрузки, гибкости, горстевой длины и группы цвета длинного трепаного волокна имеют тенденцию к росту с увеличением номера. Интервалы между минимальными и максимальными значениями в рамках одного номера увеличиваются с увеличением объемов поставок волокна этого номера.

С использованием данных, приведенных на рисунках 3 – 6, проведен статистический анализ и получены адекватные регрессионные модели.

Регрессионная модель зависимости среднего значения разрывной нагрузки ( $P$ , Н) длинного трепаного льноволокна от номера ( $N$ ):

$$P = 18.61 \cdot N. \quad (1)$$

Достижимый уровень значимости при оценке адекватности модели:  $p\text{-value} = 4.314 \cdot 10^{-7}$ , достигаемый уровень значимости при оценке значимости коэффициента модели:  $p\text{-value} = 4.314 \cdot 10^{-7}$ . Коэффициент модели статистически значим, а модель адекватна.

Регрессионная модель зависимости гибкости ( $F$ , мм) длинного трепаного льноволокна от номера ( $N$ ):



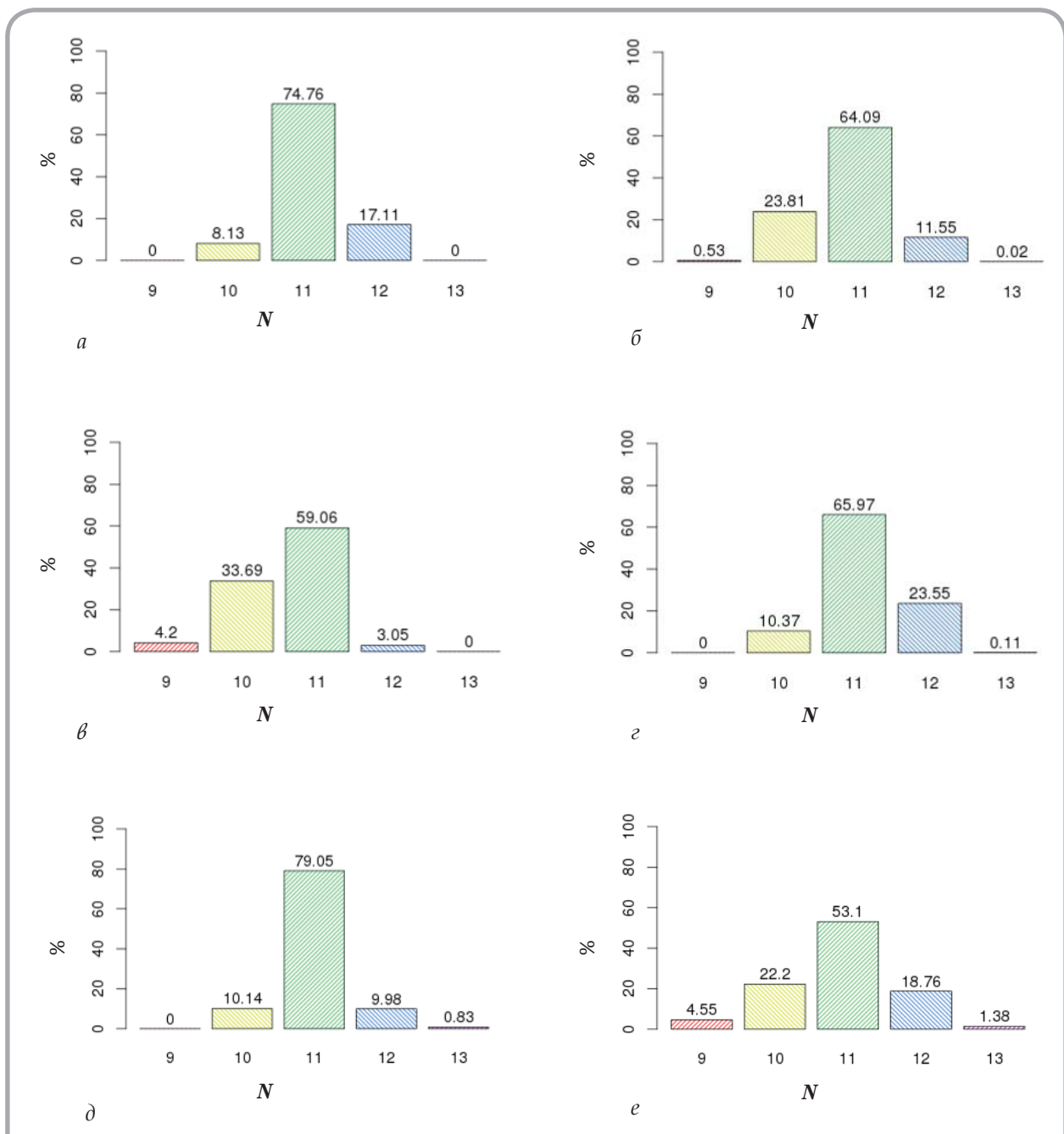


Рисунок 2 – Распределение объемов поставок по качественным характеристикам длинного трепаного льноволокна для различных регионов Беларуси: а – Брестская область; б – Витебская область; в – Гомельская область; г – Гродненская область; д– Минская область; е – Могилевская область.

$$F = 11.95 + 2.23 \cdot N. \quad (2)$$

Достижимый уровень значимости при оценке адекватности модели:  $p\text{-value} = 9.51 \cdot 10^{-4}$ .  
 Достижимый уровень значимости при оценке

значимости свободного коэффициента модели:  $p\text{-value} = 7.92 \cdot 10^{-3}$ . Достигаемый уровень значимости при оценке значимости коэффициента модели при факторе  $N$ :  $p\text{-value} = 9.51 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициенты модели статистически значимы, а модель адекватна.

Регрессионная модель зависимости среднего

значения горстевой длины ( $L$ , см) длинного трепаного льноволокна от номера ( $N$ ):

$$L = 45.96 + 1.53 \cdot N. \quad (3)$$

Достижимый уровень значимости при оценке адекватности модели:  $p\text{-value} = 4.78 \cdot 10^{-2}$ . Достижимый уровень значимости при оценке значимости свободного коэффициента модели:  $p\text{-value} = 3.1 \cdot 10^{-3}$ . Достижимый уровень значимости при оценке значимости коэффициента модели при факторе  $N$ :  $p\text{-value} = 4.79 \cdot 10^{-2}$ . Коэффициенты модели статистически значимы, а модель адекватна.

Регрессионная модель зависимости среднего

значения группы цвета ( $C$ ) длинного трепаного льноволокна от номера ( $N$ ):

$$C = -3.74 + 0.6 \cdot N. \quad (4)$$

Достижимый уровень значимости при оценке адекватности модели:  $p\text{-value} = 8.742 \cdot 10^{-4}$ . Достижимый уровень значимости при оценке значимости свободного коэффициента модели:  $p\text{-value} = 4.874 \cdot 10^{-3}$ . Достижимый уровень значимости при оценке значимости коэффициента модели при факторе  $N$ :  $p\text{-value} = 8.74 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициенты модели статистически значимы, а модель адекватна.

Анализируя регрессионные модели (1)–(4),

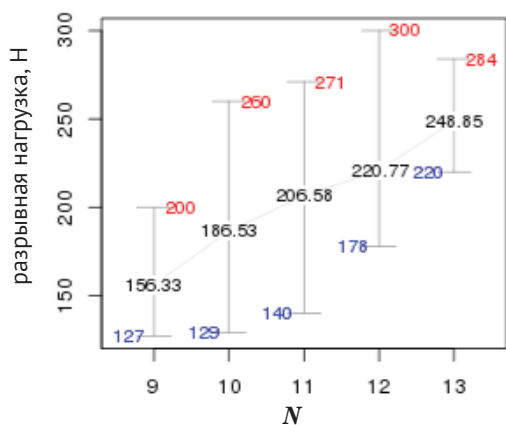


Рисунок 3 – Зависимость разрывной нагрузки длинного трепаного льноволокна от номера

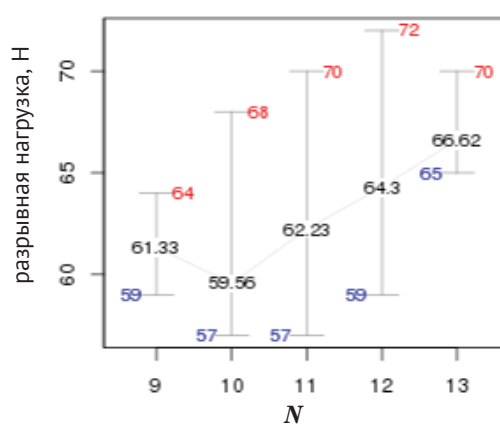


Рисунок 5 – Зависимость горстевой длины длинного трепаного льноволокна от номера

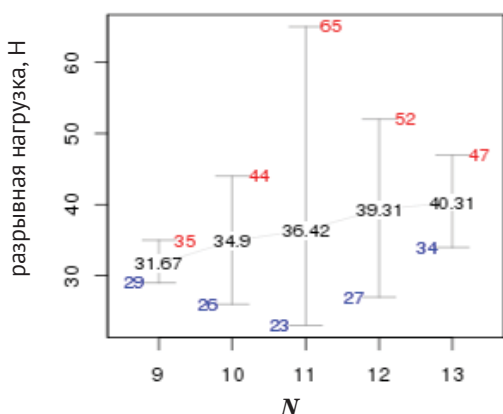


Рисунок 4 – Зависимость гибкости длинного трепаного льноволокна от номера

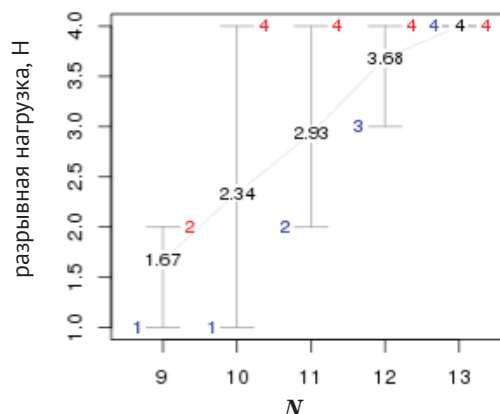


Рисунок 6 – Зависимость группы цвета длинного трепаного льноволокна от номера

можно сделать выводы, что при увеличении номера длинного трепаного льноволокна на одну единицу разрывная нагрузка в среднем увеличивается на 18.61 Н; гибкость в среднем увеличивается на 2.23 мм; горстевая длина в среднем увеличивается на 1.53 см; группа цвета в среднем увеличивается на 0.6.

На рисунке 7 приведено распределение объемов поставок длинного трепаного льноволокна различных номеров по регионам Республики Беларусь.

Как видно из рисунка 7, Могилевская, Гродненская, Минская и Витебская области лидируют в поставках длинного трепаного льноволокна 13, 12, 11 и 10 номеров соответственно.

На рисунке 8 приведено распределение объемов поставок длинного трепаного льноволокна по регионам Республики Беларусь без учёта показателей качества.

Как видно из рисунка 8, разница в объемах поставки Витебской, Минской, Брестской и Гродненской областей находится в пределах 1,5 про-

центов, последнее место по общему объему поставок занимает Гомельская область.

В производственной практике для ранжирования поставок длинного трепаного волокна по качеству могут использоваться средневзвешенный номер или сумма процентнономеров. Средневзвешенный номер поставок региона рассчитывается по формуле

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i N_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество поставок из региона;  $i$  – порядковый номер поставки;  $N_i$  – номер (показатель качества)  $i$ -й поставки;  $m_i$  – масса  $i$ -й поставки, кг.

На рисунке 9 приведены данные о средневзвешенном номере поставок регионов Республики Беларусь, лидером по этому показателю является Гродненская область.

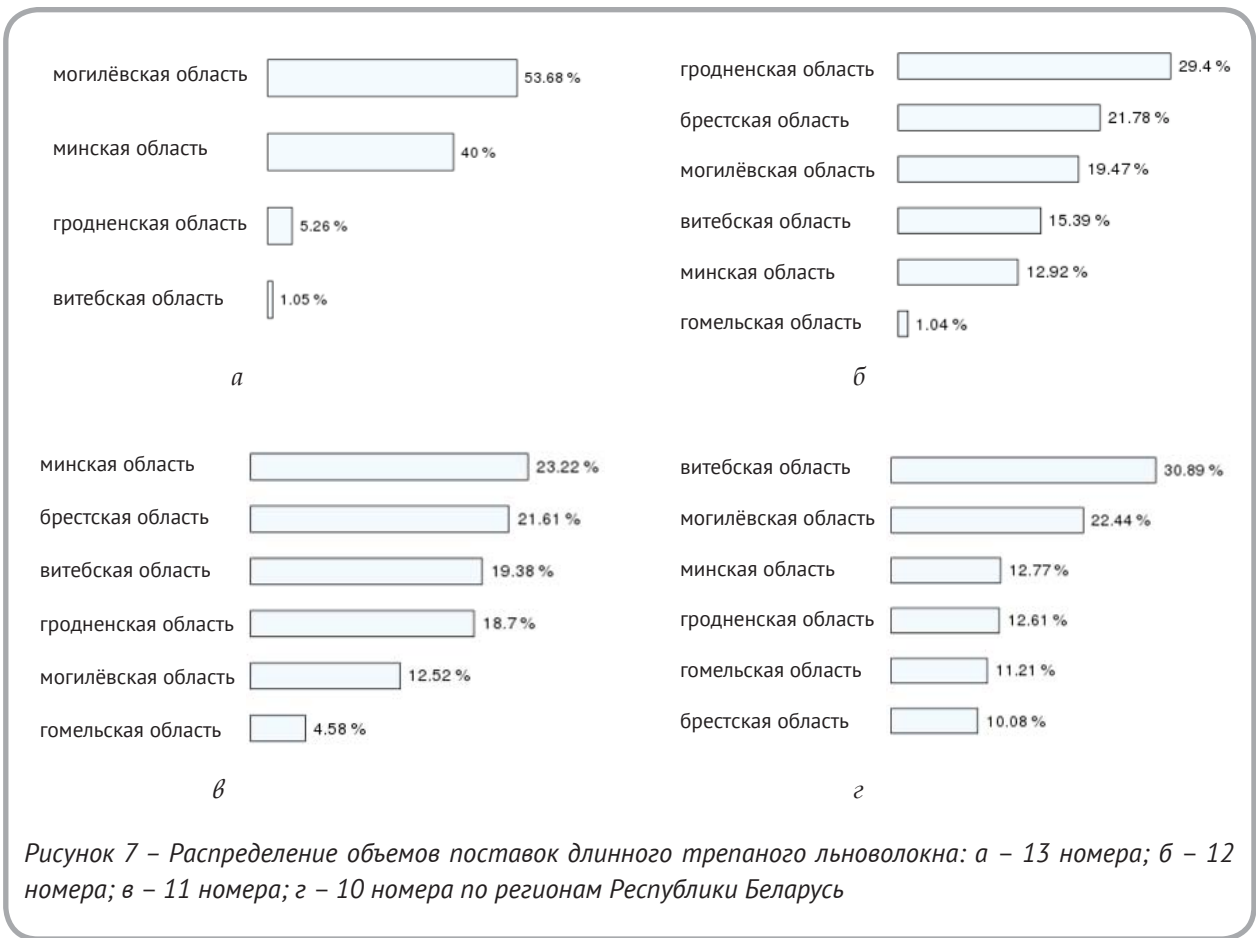


Рисунок 7 – Распределение объемов поставок длинного трепаного льноволокна: а – 13 номера; б – 12 номера; в – 11 номера; г – 10 номера по регионам Республики Беларусь



Рисунок 8 – Распределение объемов поставок длинного трепаного льноволокна по регионам Республики Беларусь без учёта номеров



Рисунок 9 – Средневзвешенный номер поставок

Сумма процентнономеров  $i$ -го региона поставщика длинного трепаного льноволокна рассчитывается по формуле

$$P_i = \sum_{j=1}^k B_{ij} \cdot N_j, \quad (6)$$

где  $N_j$  – показатель качества (номер);  $B_{ij}$  – доля поставок волокна  $j$ -го номера  $i$ -го региона в общем объеме поставок  $j$ -го номера:

$$B_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_j} \cdot 100, \quad (7)$$

где  $M_{ij}$  – масса поставок длинного трепаного льноволокна  $j$ -го номера  $i$ -го региона;  $M_j$  – общая масса поставок длинного трепаного льноволокна  $j$ -го номера.

На рисунке 10 приведены значения сумм процентнономеров регионов Республики Беларусь с учетом закупаемых льнокомбинатом номеров: 10, 11, 12 и 13.

Как видно из рисунка 10, по сумме процентнономеров первое место занимает Могилевская

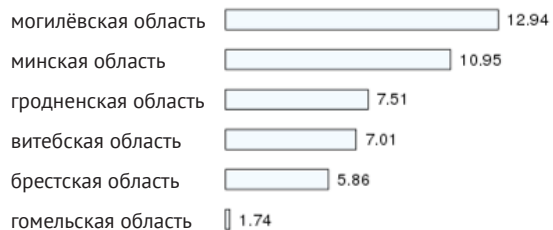


Рисунок 10 – Суммы процентнономеров регионов Республики Беларусь

область. Это объясняется тем, что Могилевская область со значительным отрывом (53,68 % рисунка 7 а) лидирует в поставках волокна 13 номера, самого высокого показателя качества в урожае 2013 года.

## ВЫВОДЫ

Информационная система контроля качества «TexLab», внедренная в производственный процесс РУПТП «Оршанский льнокомбинат», позволяет накапливать и проводить различные виды анализа данных о физико-механических свойствах длинного трепаного льноволокна и его прядильной способности.

Приведенные регрессионные модели зависимостей физико-механических свойств длинного трепаного льноволокна от номера (в диапазоне номеров 9–13), установленные взаимосвязи между качественными характеристиками и регионами поставки могут быть использованы для сравнительной оценки качества белорусского длинного трепаного льноволокна урожая 2013 года с качеством льноволокна другого происхождения.

Приведенный в статье аналитический обзор данных о физико-механических свойствах длинного трепаного льноволокна и его прядильной способности может быть использован при планировании и анализе деятельности текстильных льноперерабатывающих предприятий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дягилев, А.С., Бизюк А.Н. (2014), Информационная система контроля качества льноволокна, *Материалы докладов 47 международной научно-технической конференции преподавателей и студентов*, Витебск, 2014, С. 222-224.
2. Дягилев, А.С., Бизюк А.Н., Коган А.Г. (2014), Контроль качества длинного трепаного льноволокна, *Материалы докладов 47 международной научно-технической конференции преподавателей и студентов*, Витебск, 2014, С. 432-434.
3. Киприна, Л.Ю. Предпосылки к использованию CALS-технологий в системе управления качеством на предприятиях текстильной промышленности, *Технология текстильной промышленности*, 2011, No 5, С. 5-7.
4. СТБ 1195-2008 Волокно льняное трепаное длинное
5. ГОСТ 10330-76 Лен трепаный

## REFERENCES

1. Dyagilev, A.S., Biziuk, A.N., (2014) Information system of quality control flax [Informacionnaja sistema kontrolja kachestva l'novolokna], *Proceedings of the 47 International scientific and technical conference of teachers and students*, Vitebsk, 2014, pp. 222-224.
2. Dyagilev, A.S., Biziuk, A.N., Kogan, A.G., Quality control long scutched flax [Kontrol' kachestva dlinnogo trepanogo l'novolokna], *Proceedings of the 47 International scientific and technical conference of teachers and students*, Vitebsk, 2014, pp. 432-434.
3. Kiprino L.Y., Prerequisites for use of CALS-technologies in the quality management system of textile companies [Predposylki k ispol'zovaniju CALS-tehnologij v sisteme upravlenija kachestvom na predpriyatijah tekstil'noj promyshlennosti], *Izvestija vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti - News of high schools. Technology textile industry*, 2011, № 5, pp 5-7.
4. STB 1195-2008 Fibre flax scutching long. Technical specification.
5. GOST 10330-76 Scutched flax fibre. Technical specification.

*Статья поступила в редакцию 27.10.2014 г.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ МНОГОЦИКЛОВЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.А. Кузнецов

УДК 677.017

## РЕФЕРАТ

*БОЕВАЯ ОДЕЖДА ПОЖАРНЫХ, МНОГОЦИКЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, СТИРКА, МНОГОКРАТНЫЙ ИЗГИБ И ИСТИРАНИЕ, ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ*

Объектом исследования является пакет материалов, используемый при изготовлении боевой одежды пожарных для подразделений МЧС РБ.

Целью данной работы является комплексное исследование степени влияния основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, а также разработка методов соответствующих испытаний.

Установлен характер влияния различных эксплуатационных факторов (механических, тепловых и влажно-тепловых) на защитные свойства пакета материалов боевой одежды пожарных. Разработана математическая модель взаимосвязи устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов нагружения различными факторами износа. Предложен методологический подход, позволяющий произвести классификацию различных факторов износа по степени оказываемого влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов боевой одежды пожарных.

## ABSTRACT

*FIRE FIGHTER'S PROTECTIVE CLOTHING, MULTICYCLIC ACTION, STABILITY TO THERMAL ACTION OF THE PACKAGE OF MATERIALS*

The results of research of influence of the basic operational factors on the change of protective properties of fire fighter's protective clothing are presented. Mathematical models of dependence of stability to thermal action of the package of materials and the number of cycles of action are received by various factors of deterioration. The methodological approach for classification of factors of deterioration by degree of influence on reduction of protective properties of a package of materials of fire fighter's protective clothing is offered.

Боевая одежда пожарных (БОП) является основным и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении любых пожаров и при проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ. Производители современной БОП, стоящей на вооружении подразделений МЧС Республики Беларусь, гарантируют ее соответствие требованиям действующего стандарта СТБ 1971–2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарная боевая. Общие технические условия» [1].

Однако нормативные требования к показателям теплофизических свойств материалов служат только мерой качества изготовления БОП и не могут быть использованы для оценки ее эксплуатационных свойств [2].

В настоящее время отсутствует комплексный мониторинг изменения защитных свойств одежды пожарных в процессе ее использования. Изъятие из эксплуатации происходит только при наличии видимых термических либо механических повреждений. Однако применение только визуального контроля неизбежно влечет за со-

бой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и, как следствие, невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации [3].

На сегодня существует крайне ограниченное количество исследований, направленных на установление теоретических закономерностей, оценку и прогнозирование качества защитной одежды пожарных в процессе ее эксплуатации [2], [4], [5]. Отсутствие информации об изменении защитных свойств, а также методики проведения эксплуатационных испытаний, регламентированной стандартом, сдерживает совершенствование существующих и разработку новых материалов для изготовления БОП.

Целью данной работы является комплексное исследование степени влияния основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, а также разработка методов соответствующих испытаний.

В качестве объекта экспериментальных исследований использовался следующий пакет материалов, из которых изготавливают БОП для подразделений МЧС РБ: ткань из термостойкого синтетического волокна «Арселон-С», артикул 09с-365, саржевого переплетения, поверхностная плотность  $223 \pm 11$  г/м<sup>2</sup> с нанесенным мембранным покрытием  $130 \pm 30$  г/м<sup>2</sup> ТУ 80005044.003–2012 (материал верха, совмещенный с водонепроницаемым слоем); ватин полушерстяной холстопршивной, поверхностная плотность  $235$  г/м<sup>2</sup> (теплоизоляционная подстежка); хлопчатобумажная ткань, поверхностная плотность  $140$  г/м<sup>2</sup> (подкладочная ткань).

Экспериментальные исследования проводились в условиях аккредитованной лаборатории при научно-исследовательском центре Витебского областного управления МЧС с использованием установки для определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

В ходе комплекса экспериментальных исследований реальные условия, которые защитная одежда пожарных испытывает в процессе эксплуатации, моделировались при помощи лабораторных воздействий различными факторами износа.

Испытания проводились циклически и со-

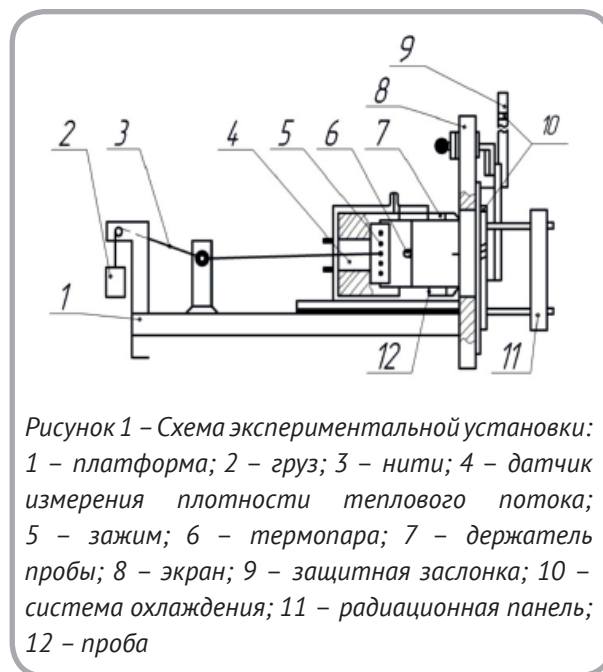


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термopара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

стояли из этапов механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий, действующих на материалы по отдельности, попарно и совместно. Один этап механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий включал, соответственно:

- многократный изгиб и истирание материала верха мягким абразивом в течение 700 циклов;
- воздействие на пакет материалов теплового потока плотностью  $5$  кВт/м<sup>2</sup> в течение 240 секунд и  $40$  кВт/м<sup>2</sup> в течение 5 секунд;
- стирка материала верха в растворе синтетического моющего средства при температуре плюс  $40$  °С.

Методика и средства для осуществления многократного изгиба и истирания материала верха регламентированы СТБ 1972–2009 [6]. Методика и средства для воздействия теплового потока на пакет материалов регламентированы СТБ 1971–2009 [1]. Стирка материала верха регламентирована СТБ 1971–2009 [1] и осуществляется в стиральных машинах барабанного типа.

До испытания и периодически, после соответствующего цикла нагружения, проводилась оценка времени, по истечении которого температура на внутренней поверхности пакета материалов изменится на  $50$  °С при воздействии теплового потока плотностью  $5,0$  кВт/м<sup>2</sup>. Данный

показатель аналогичен нормативному показателю пакета материалов БОП – устойчивость пакета к воздействию теплового потока, но в отличие от него дает количественную оценку защитных свойств пакета материалов БОП [2].

Количество циклов воздействия ограничивалось снижением устойчивости пакета к воздействию теплового потока до уровня 100 секунд.

Основные результаты экспериментальных исследований влияния многоцикловых воздействий основных эксплуатационных факторов на устойчивость пакета материалов к воздействию теплового потока представлены на рисунке 2.

Для повышения информативности полученных результатов на данном рисунке представлен уровень соответствия устойчивости пакета к воздействию теплового потока нормативным требованиям ( $8, \tau = 240$  с).

В ходе предварительного анализа результатов эксперимента:

1. Установлен закономерный характер снижения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока при увеличении количества циклов нагружения вне зависимости от вида фактора износа.

2. Для исследуемого состава пакета материалов наименьшее влияние на изменение устойчивости пакета материалов оказывает фактор износа, состоящий только из стирки (рисунок 2, кривая 1), а наибольшее – комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воздействия, многократного изгиба и истирания, стирки (рисунок 2, кривая 7).

3. Степень совместного влияния двух различных факторов износа на исследуемый показатель практически одинакова (рисунок 2,

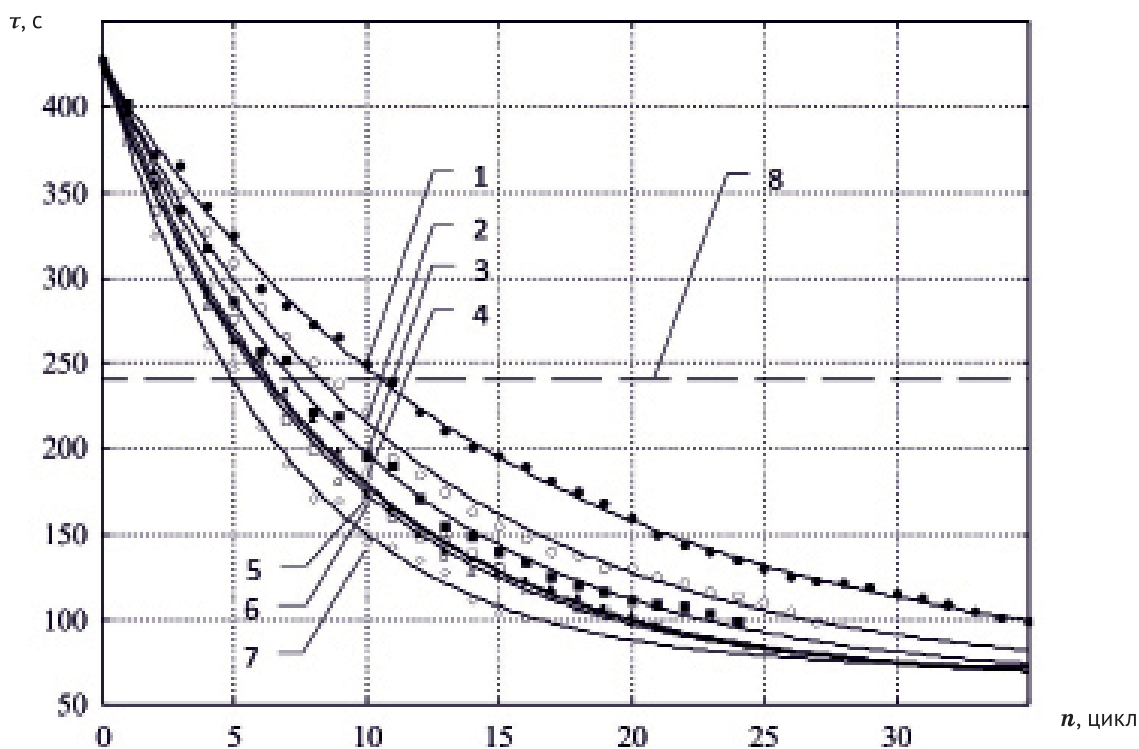


Рисунок 2 – Зависимость устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, состоящих из различных факторов износа  $\tau$  ( $n$ ): 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие; 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка; 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание; 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка; 8 – уровень устойчивости пакета к воздействию теплового потока, соответствующий нормативным требованиям



кривые 4, 5, 6).

Для научно-обоснованной классификации различных факторов износа по степени влияния на защитные свойства пакета материалов БОП предположим, что процесс изнашивания защитной одежды при воздействии различных эксплуатационных факторов идентичен процессу накопления уровня повреждений в нестационарном процессе Пуассона. Следует отметить, что данный методологический подход довольно успешно использован автором для аналитического описания процессов, происходящих при испытании текстильных нитей на истирание и многоцикловое растяжение [7–8].

По определению процесс Пуассона является моделью эксперимента либо испытания, при котором определяются либо число определенных событий, которые имеют место в течение определенного периода времени  $t$ , либо изменение состояния наблюдаемого объекта [9].

Процесс Пуассона будет считаться нестационарным, если вероятность появления одного события в интервале  $(t, t + \Delta t)$  будет зависеть от выбора расположения интервала на оси времени и определяться

$$P_i(t, t + \Delta t) = \frac{c}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} \quad (1)$$

где  $c$  – параметр стационарности процесса Пуассона (если  $c = 1$ , то процесс Пуассона – стационарный);  $b$  – коэффициент пропорциональности.

Интегральная функция распределения нестационарного процесса Пуассона  $F(t)$ , определяющая вероятность того, что одно событие произойдет до времени  $t$ , имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]. \quad (2)$$

Вследствие того, что у рассматриваемого пакета материалов происходит закономерное снижение устойчивости к воздействию теплового потока при увеличении количества циклов нагружения, соотношение (2) применительно к исследуемому процессу можно записать в сле-

дующем виде:

$$\frac{\tau_0 - \tau(t)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]. \quad (3)$$

Так как время нагружения пропорционально числу циклов, то модель (3) удобно переписать в следующем виде:

$$\frac{\tau_0 - \tau(n)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{b}\right)^c\right], \quad (4)$$

где  $\tau(n)$  – текущее значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП после  $n$  циклов нагружения,  $c$ ;  $\tau_{кр}$  – критическое значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП, соответствующее такому состоянию пакета, при котором устойчивость материалов остается постоянной и больше не зависит от количества циклов нагружения,  $c$ ;  $\tau_0$  – начальное значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП,  $c$ .

Обозначив  $M = 1 / b^c$ , математическую модель (4) удобно представить в виде:

$$\theta(n) = \frac{\tau_0 - \tau(n)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = 1 - \exp[-Mn^c], \quad (5)$$

или

$$\tau(n) = \tau_{кр} + (\tau_0 - \tau_{кр}) \exp[-Mn^c], \quad (6)$$

где  $q(n)$  – значение уровня структурных повреждений, как функции количества циклов нагружения (времени испытаний);  $M$  – темповой параметр моделей, цикл<sup>-1</sup>.

Следует отметить, что в случае стационарности процесса Пуассона темповой параметр  $M$  является величиной, обратной такому количеству циклов нагружения, по истечении которых текущее изменение устойчивости к воздействию теплового потока по отношению к критической устойчивости  $(\tau(n) - \tau_{кр})$  меньше максимально возможного  $(\tau_0 - \tau_{кр})$  в  $e$  раз для данного паке-

та материалов.

Для оценки параметров разработанных математических моделей (5), (6) производилась обработка результатов экспериментальных исследований с использованием математического статистического пакета «Statistica for Windows». Численные значения параметров моделей (5), (6) взаимосвязи устойчивости пакета к воздействию теплового потока и количества циклов нагружения представлены в таблице 1.

По результатам проведенного моделирования процесса ухудшения защитных свойств при проведении многоциклового испытания установлено следующее:

- численные значения коэффициента детерминации  $R^2$  модели (6) для исследуемых факторов износа находятся в пределах от 0,998 до 0,999, что свидетельствует о достоверности модели и возможности ее практического использования для прогнозирования устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения;

- численные значения параметров  $\tau_{кр}$  и  $\tau_0$  математической модели (6) не зависят от условий проведения многоциклового испытания, а определяются теплофизическими свойствами пакета материалов;

- для всех исследуемых факторов износа численные значения параметра  $\epsilon$  модели (6) практически одинаковы и стремятся к 1. Данный факт указывает на стационарность рассматриваемого процесса Пуассона накопления уровня повреждений (устойчивости пакета материалов

к воздействию теплового потока) при многократном воздействии различных факторов износа;

- изменение значения параметра  $M$  указывает на его зависимость от вида фактора износа. Численное значение параметра  $M$  пропорционально степени влияния фактора износа на изменение устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока.

Использование соотношения (6) позволяет провести анализ интенсивности процесса снижения исследуемого показателя теплозащитных свойств пакета материалов БОП при воздействии различных факторов износа (для упрощения практического использования параметр стационарности  $\epsilon$  модели (6) можно принять за 1):

$$I_{\tau}(n) = \left| \frac{d\tau(n)}{dn} \right| = \left| - \frac{M(\tau_0 - \tau_{кр})}{\exp(Mn)} \right|.$$

На рисунке 3 представлены зависимости интенсивности процесса снижения теплозащитных свойств пакета материала БОП от количества циклов нагружения для исследуемого пакета материалов. Комплексный анализ данных зависимостей позволяет провести классификацию различных факторов износа по степени их влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов БОП. Например, наибольшее влияние на изменение устойчивости пакета материалов к тепловому потоку оказывает комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воз-

Таблица 1 – Численные значения параметров математических моделей (5), (6)

Фактор износа	$\tau_0, \epsilon$	$t_{кр}, \epsilon$	$M, \text{цикл}^{-1}$	$\epsilon$	Коэффициент детерминации, $R^2$
1.Тепловое воздействие	425,8	76,6	0,088	1,09	0,998
2.Многokrатный изгиб и истирание	417,5	87,4	0,065	1,17	0,998
3.Стирка	424,2	67,3	0,069	0,99	0,999
4.Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание	424,3	73,1	0,112	1,05	0,998
5.Многokrатный изгиб и истирание, стирка	428,5	71,3	0,109	1,04	0,999
6.Тепловое воздействие, стирка	421,2	67,9	0,109	1,03	0,998
7.Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка	427,6	68,9	0,149	1,00	0,998

действия, многократного изгиба и истирания, стирки, соответствующее максимальному значению  $I_{\tau} = 54,0$  [с цикл<sup>-1</sup>](рисунок 3).

В результате проведенного комплекса исследований:

- установлен характер влияния различных эксплуатационных факторов (механических, тепловых и влажно-тепловых) на защитные свойства пакета материалов БОП;

- разработана математическая модель взаимосвязи устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов нагружения различными факторами износа;

- предложен методологический подход, позволяющий произвести классификацию различных факторов износа по степени оказываемого влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов БОП.

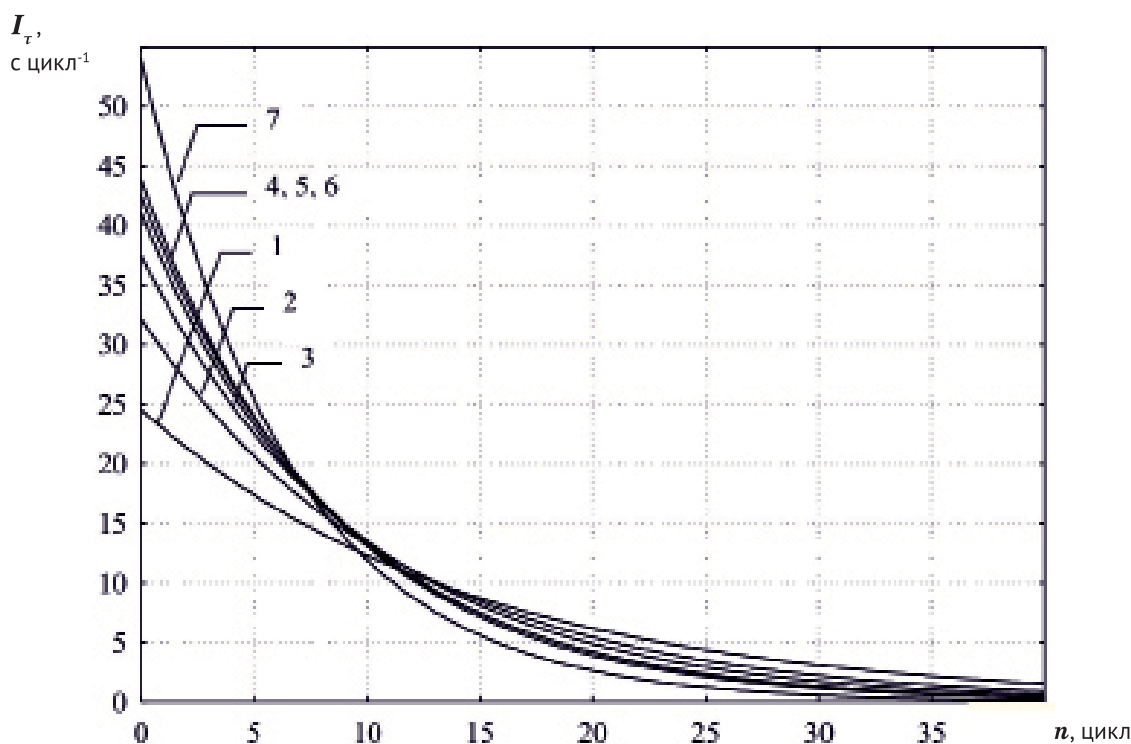


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности процесса снижения устойчивости материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, состоящих из различных факторов износа  $I_{\tau}(n)$ : 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие; 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка; 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание; 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТБ 1971–2009 (2010), Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия, Минск: Госстандарт, 2010, 36 с.
2. Гусаров, А.М., Кузнецов, А.А., Дмитракович, Н.М. (2011), Исследования устойчивости пакета материалов боевой одежды пожарного к многоцикловому тепловому воздействию, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2011, № 22, С. 39–47.
3. Slater, K. (1986), The progressive deterioration of textile materials, I: *Characteristics of degradation*, *Journal of the Textile Institute*, 1986, Vol. 77, № 2, pp. 76-87.
4. Гусаров, А.М., Кузнецов, А.А., Дмитракович, Н.М. (2012), Прогнозирование температуры на внутренней поверхности пакета материалов боевой одежды пожарного при многоцикло-вом тепловом воздействии, *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*, 2012, № 2, С. 140-147.
5. Gagnon, B. D. (2000), Evaluation of New Test Methods for Fire Fighting Clothing, M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute [Electronic resource], (2000), available at: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0418100-155520/unrestricted/gagnon.pdf/> (accessed 31 January 2011).
6. СТБ 1972–2009 (2010), Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия, Минск: Госстандарт - НИЦ ВОУ МЧС г.Витебск, 2010, 46 с.

## REFERENCES

1. Belarusian state standard 1971-2009 (2010), Standards of safety of work. Fire fighter's protective clothing. The general requirements [Sistema standartov bezopasnosti truda. Odezhda pozharnyh boevaja. Obshhie tehicheskie uslovija], Minsk: Gosstandart – Minsk: State standard, 2010, 36 p.
2. Gusarov, A.M., Kuznetsov, A.A., Dmitrakovich, N.M. (2011), Researches of stability of the package of materials of fire fighter's protective clothing to multicyclic thermal action [Issledovanija ustojchivosti paketa materialov boevoj odezhdy pozharnogo k mnogociklovomu teplovomu vozdejstvuju], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Herald Vitebsk State Technological University*, 2011, № 22, pp. 39–47.
3. Slater, K. (1986), The progressive deterioration of textile materials, I: Characteristics of degradation, *Journal of the Textile Institute*, 1986, Vol. 77, № 2, pp. 76-87.
4. Gusarov, A.M., Kuznetsov, A.A., Dmitrakovich, N.M. (2012), Temperature forecasting for the internal surface of the package of materials of fire fighter's protective clothing at multicyclic thermal influence [Prognozirovanie temperatury na vnutrennej poverhnosti paketa materialov boevoj odezhdy pozharnogo pri mnogociklovom teplovom vozdejstvii], *Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidacija – Emergency Situations: the prevention and liquidation*, 2012, № 2, pp. 140-147.
5. Gagnon, B. D. (2000), Evaluation of New Test Methods for Fire Fighting Clothing, M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute [Electronic resource], (2000), available at: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0418100-155520/unrestricted/gagnon.pdf/> (accessed 31 January 2011).

7. Кузнецов, А.А. (2007), Вероятностная модель накопления остаточной циклической деформации при проведении многоцикловых испытаний на растяжение, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2007, № 1, С. 23–27.
8. Кузнецов, А.А., Ольшанский, В.И. (2004), *Оценка и прогнозирование физико-механических свойств текстильных нитей*, УО «ВГТУ», Витебск, 226 с.
9. Ивахненко, А.Г., Юрачковский, Ю.П. (1986), *Моделирование сложных систем по экспериментальным данным*, Москва, 123 с.
6. Belarusian state standard 1972-2009 (2010), Special protective Clothes of firemen from the increased thermal influences. The general requirements [Odezhda pozharnyh special'naja zashhitnaja ot povyshennyh teplovyh vozdeystvij. Obshhie tehicheskie uslovija], Minsk: Gosstandart - Minsk: State standard, 2010, 46 p.
7. Kuznetsov, A.A. (2007), Likelihood model of accumulation of residual cyclic deformation at carrying out of multicyclic tests for a stretching [Verojatnostnaja model' nakoplenija ostatochnoj ciklicheskoj deformacii pri provedenii mnogociklovyh ispytanij na rastjazhenie], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti – Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology*, 2007, №1, pp. 23–27.
8. Kuznetsov, A.A., Olshansky, V.I. (2004), *Ocenka i prognozirovanie fiziko-mehaničeskikh svojstv tekstil'nyh nitej*, [Estimation and forecasting of physicomachanical properties of textile threads], Vitebsk, 239 p.
9. Ivahnenko, A.G., Jurachkovskij, Ju.P. (1986), *Modelirovanie slozhnyh sistem po jeksperimental'nyh dannym*, [Modeling of complex systems on experimental data], Moscow, 123 p.

Статья поступила в редакцию 11. 11. 2014 г.

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ КОМПЛЕКСНЫХ НИТЕЙ РАЗЛИЧНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ

А.А. Кузнецов

УДК 677.021.12

### РЕФЕРАТ

*ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫЕ НИТИ, ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИТИ, КОЭФФИЦИЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЧНОСТИ НИТИ, МЕТОД СТАТИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИИ ПОЛУЦИКЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ*

*Объектом исследования являются полипропиленовые нити различного способа получения.*

*Целью исследования являлось выявление особенностей деформирования и разрушения полипропиленовых нитей различного способа получения: BCF, Heat-set, Frize.*

*Установлено, что способ получения полипропиленовых нитей оказывает влияние на их разрывные характеристики. Наибольшую нагрузку до момента разрыва выдерживает нить Frize.*

*Сравнительный анализ значений коэффициента реализации прочности, полученных по двум совершенно различным методологическим подходам, наглядно свидетельствует о правомочности использования метода статистического имитационного моделирования испытания при изучении механических свойств текстильных нитей. Установлено, что наибольшим коэффициентом реализации прочности нити обладают полипропиленовые нити Heat-set и Frize.*

### ABSTRACT

*POLYPROPYLENE THREADS, STRENGTH CHARACTERISTICS, COEFFICIENTS OF REALIZATION OF STRENGTH OF THE THREAD, METHOD OF STATIC IMITATION OF SEMICYCLIC TEST FOR THE STRETCHING*

*Results of research of mechanical properties polypropylene threads of a various way of reception are presented. Dependence strength characteristics polypropylene threads from a way of their manufacture is installed. The new methodological approach for definition of coefficients of realization of strength of polypropylene threads of a various way of reception is offered. The Comparative analysis of values of coefficients of realization of strength received on two absolutely various methodological approaches is carried out.*

За последние годы в мировом балансе текстильного сырья наблюдается значительное увеличение темпов производства и потребления полипропиленовых (ПП) волокон и нитей, которые широко используются в сфере производства наиболее массового вида продукции – напольных ковровых покрытий. В настоящее время мировая тенденция такова, что суммарная доля ПП волокон и нитей в ворсовых коврах примерно в 5 раз выше, чем шерсти. За последние несколько лет существенно увеличился удельный вес ковров из ПП нитей и у белорусских производителей. По способу получения полипропиленовые нити подразделяются на BCF,

Heat-set, Frize. BCF – нить, которая состоит из волокон, полученных из экструдера. Ей придают дополнительный объем и специально вытягивают при последующей перемотке на бобину. Heat-Set – самый распространённый вид нити для изготовления синтетических ковров нового поколения. Для получения нити Heat-Set нить BCF подвергают термической обработке, вытягивают и скручивают вокруг своей оси (чем больше крутка, тем лучше качество). Нить Heat-Set обладает лучшими антистатическими свойствами и более долговечна в эксплуатации, чем нить BCF. Frize – данный вид ППН получают из нитей Heat-Set, которые скручивают в два сло-

жения в направлении  $S$  и  $Z$ , обрабатывают при очень высокой температуре и влажности. Две скрученные нити и механическо-термическая обработка делают структуру пряжи еще более похожей на структуру шерсти, пряжа приобретает оригинальный эффект «извитости». Применяемые отечественными предприятиями ПП нити для ворсовой основы являются импортным сырьем, и указанные в контрактах показатели характеризуют в основном структуру нити и её прочностные свойства.

Целью исследования являлось выявление особенностей деформирования и разрушения полипропиленовых нитей различного способа получения.

Вследствие того, что полипропиленовые нити различных производителей относят к комплексным нитям, их прочностные характеристики, а также особенности их деформирования и разрушения определяются прочностными свойствами элементарных нитей, их количеством и неравномерностью их разрушения. Последнее обуславливается структурой и формой элементарной нити. Установлено, что видом поперечного сечения исследуемых полипропиленовых элементарных волокон является «трилобал» – трехлучевое сечение (рисунок 1).

Строение (структура) полипропиленовых нитей в значительной мере определяет их свойства и возможности использования. Обычно структура определяется размерами, формой элементов, из которых состоят полипропиленовые текстильные нити, взаимным расположени-

ем элементов и их свойствами. Характеристики структуры включают характеристики элементов, их взаимного расположения и связей. Из характеристик элемента наиболее важными являются показатели размеров, формы, его состояния и свойств. Применительно к комплексным нитям такими показателями являются количество элементарных нитей, толщина (тонина) элементарных нитей (филаментов), неравномерность по этим показателям, вид поперечного сечения элементарного волокна, показатели механических и других свойств. Число филаментов и линейная плотность исследуемых комплексных нитей было определено путем их непосредственного подсчета, результаты которого представлены в таблице 1.

У химических нитей отмечается наличие поперечной гетерогенности показателей структуры и механических свойств [1, 2, 3]. Наличие указанной гетерогенности обусловлено неоднородностью физических полей в зоне формования и последующих обработок нитей (температурных, концентрационных, аэрогидродинамических, реологических) [4]. Можно отметить, что увеличение количества элементарных нитей в комплексной приводит увеличению степени поперечной гетерогенности структуры и показателей механических свойств [4]. Это связано с тем, что в пучке нитей возможно проявление их разнородности [2]. Однако существующие методы исследования влияния поперечной неравномерности свойств на особенности процессов деформирования и разрушения пучка нитей

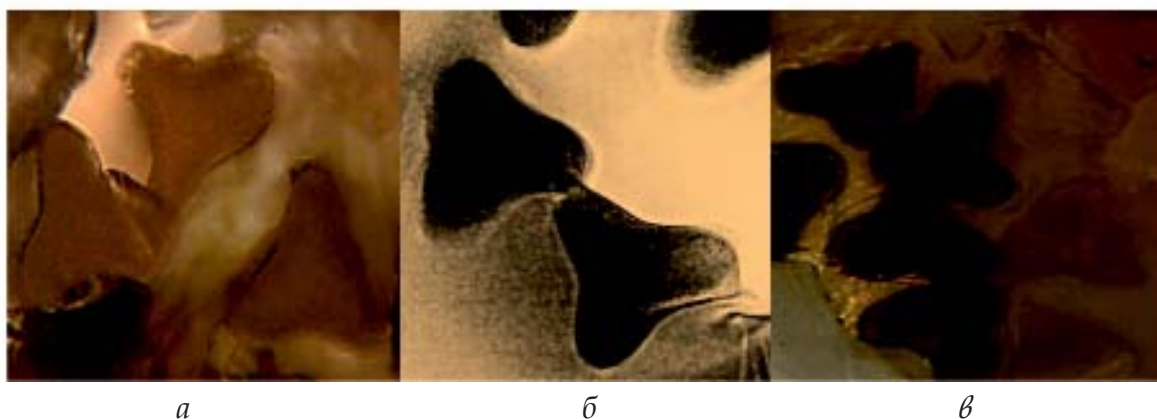


Рисунок 1 – Общий вид поперечных сечений исследуемых элементарных полипропиленовых нитей: а – BCF (Турция), б – Heat-Set (Турция), в – Frize (Франция)

Таблица 1 – Характеристики структуры полипропиленовых нитей

Вид нити	Наименование производителя	Число элементарных нитей	Линейная плотность, текс	
			Номинальная	Фактическая
BCF	Filartion, Франция	135	260	259
Heat-set	Tattextil, Турция	144	210	204
Frize	Arasta, Турция	135	260	277

весьма трудоёмки, и как отмечается в исследованиях, представленных в работах [4, 5], довольно часто не дают количественную информацию о степени влияния каждой из них на показатели механических свойств. Вместе с тем методы, позволяющие осуществлять прогноз степени гетерогенности в зависимости от формы и параметров диаграммы растяжения, практически отсутствуют.

Следовательно, проведение комплекса исследований, направленных на изучение степени влияния поперечной гетерогенности показателей механических свойств текстильных нитей на особенности механизма их деформирования и разрушения, является актуальной научно-технической задачей.

В работах [1, 4, 5] профессор К.Е. Перепёлкин отмечает несомненную практическую значимость такого показателя, как коэффициент реализации прочности для комплексных химических нитей, численное значение которого определяется следующим соотношением:

$$K_p = \frac{P_n}{n P_1}, \quad (1)$$

где  $P_n$  – значение разрывной нагрузки комплексной нити, Н;  $P_1$  – значение разрывной нагрузки элементарной нити, Н;  $n$  – число элементарных нитей в комплексной.

Однако, вследствие трудоёмкости оценки данного показателя в работах [4, 5] предлагается производить его оценку на основе анализа диаграммы растяжения (не только левой, но и правой, нисходящей её части) с использованием следующего соотношения:

$$K_p = \xi \sqrt{\frac{W_{max}}{W_{полн}}}, \quad (2)$$

где  $W_{max}$  – работа деформации до точки максимума, Дж;  $W_{полн}$  – работа деформации до точки полного разрыва, Дж;  $\xi$  – показатель, связанный с коэффициентом вариации прочности филаментов в комплексной нити,  $\xi = 1,02$  [4].

В исследованиях, представленных в работах [6–8], автором на основании использования метода статической имитации полуциклового испытания на растяжение проводится анализ самого общего случая испытания на растяжение пучка слабосвязанных нитей, что характерно для процесса деформирования и разрушения полиэфирных комплексных нитей с пологой круткой либо при зажимном расстоянии меньше критического. Установлен закономерный характер уменьшения разрывной нагрузки комплексной нити при увеличении степени разносторонности элементарных нитей пучка, а оценку коэффициента реализации прочности комплексных нитей предлагается производить на основании использования следующего соотношения:

$$K_p = \frac{P_p(C_L)}{P_{p0}} = \exp[-\alpha C_L], \quad (3)$$

где  $P_p(C_L)$  – значение разрывной нагрузки комплексной нити  $P_p$  как функции степени разносторонности филаментов (коэффициента вариации)  $C_L$ , Н;  $P_{p0}$  – значение разрывной нагрузки нити при отсутствии поперечной разносторонности филаментов, Н;  $\alpha$  – параметр модели, характеризующий темп снижения разрывной нагрузки нити при увеличении степени разносторонности филаментов,  $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1 / \%}$ .

Для практического использования соотношения (3) возникает необходимость в оценке степени поперечной разносторонности филаментов нити  $C_L$ . В исследованиях, представленных в работах [6, 7], методами статистического имитационного моделирования процессов дефор-



мирования и разрушения пучка текстильных нитей показана возможность оценки данного показателя на основе комплексного анализа диаграммы растяжения (не только восходящей, что является общепринятым подходом, но и нисходящей части диаграммы):

$$C_L = \frac{1}{K_L} \left[ \arctg \left( \frac{L_f}{P_f} \right) - \arctg \left( \frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} \right) \right], \quad (4)$$

где  $P_f$  – текущее значение нагрузки, при котором в деформировании участвуют все нити пучка, Н;  $L_f$  – абсолютное удлинение нитей пучка, при котором в деформировании участвуют все нити (волокна) пучка, мм;  $\varepsilon_p$  – относительное разрывное удлинение нити, %;  $\sigma_y$  – условный предел упругости нити, Па;  $K_L$  – параметр модели, характеризующий абсолютное изменение угла наклона касательной, проведенной к восходящей части диаграммы растяжения при увеличении степени разнотолщинности филаментов нити на 1 % ( $K_L = 1,66$  град / %), град / %.

Обоснование физического смысла параметров модели (4), а также методика их оценки по результатам комплексного анализа диаграмм растяжения довольно полно изложена в работах [7, 8].

Для проверки правомерности практического использования результатов, полученных в ходе проведенных исследований, в условиях специализированной лаборатории учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС» на разрывной машине РМ – 50 К проведен комплекс экспериментальных исследований. При проведении испытаний зажимная длина составляла 500 мм, средняя продолжительность процесса деформирования до разрыва нити ( $20 \pm 3$ ) с, предварительное натяжение – 100 сН, количество испытаний для каждого образца равнялось 50. В качестве объектов исследований использовались полипропиленовые комплексные нити различных способов получения, характеристики структуры которых были представлены в таблице 1.

Экспериментальные диаграммы растяжения исследуемых нитей представлены на рисунке 2.

В таблице 2 представлены основные результаты экспериментальной оценки и прогнозные значения показателей механических свойств по

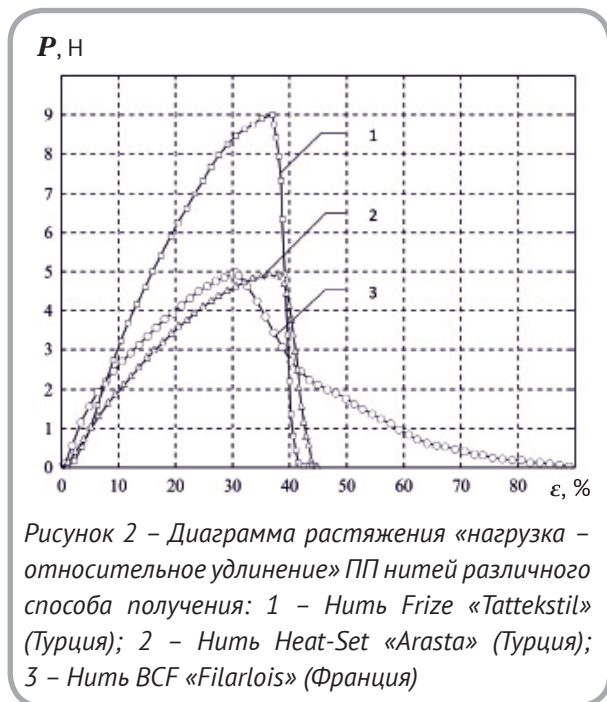


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения «нагрузка – относительное удлинение» ПП нитей различного способа получения: 1 – Humь Frize «Tattekstil» (Турция); 2 – Humь Heat-Set «Arasta» (Турция); 3 – Humь BCF «Filarlois» (Франция)

двум методикам, приведенным в работах [5, 6] для исследуемых образцов полипропиленовых нитей.

Анализ результатов экспериментальной оценки показателей прочностных свойств полипропиленовых нитей позволяет отметить, что:

- различие способа получения полипропиленовых нитей (BCF, Heat-set, Frise) оказывает влияние на их разрывные характеристики;
- наибольшую нагрузку до момента разрыва выдерживает нить Frize ( $P_p = 9,02$  Н при относительном удлинении  $\varepsilon_p = 36,95$  %). Значительно меньшую нагрузку выдерживают нити Heat-set ( $P_p = 4,93$  Н при относительном удлинении  $\varepsilon_p = 37,32$  %) и BCF ( $P_p = 4,96$  Н при относительном удлинении  $\varepsilon_p = 30,52$  %).

Сравнительный анализ прогнозных значений показателей механических свойств полипропиленовых нитей показал, что:

- отклонения значений коэффициента реализации прочности, определенного по двум совершенно различным методологическим подходам, не превышает 5 %. Следовательно, метод статистической имитации полуциклового испытания на растяжение, применяемый при исследовании полиэфирных нитей [7, 8], правомочно использовать и при исследовании полипропиленовых нитей;
- установлено, что наибольшим коэффи-

Таблица 2 – Результаты экспериментальной оценки и прогнозные значения показателей механических свойств ПП нитей различного способа получения

Показатель	Нить VCF Filartion, Франция	Нить Heat-Set «Arasta», Турция	Нить Frize «Tattekstil», Турция
Значение разрывной нагрузки, $P_p$ , Н	4,96	4,93	9,02
Относительное разрывное удлинение, соответствующее разрушению первого филамента нити, $\epsilon_p$ , %	30,52	37,32	36,95
Относительное полное разрывное удлинение, $\epsilon_{pn}$ , %	90,30	44,88	43,98
Условный предел упругости, $\sigma_y$ , МПа	23,95	4,02	11,91
Нагрузка, при которой в деформировании участвуют все филаменты нити, $P_p$ , Н	1,98	1,99	6,01
Абсолютное удлинение, при котором в деформировании участвуют все филаменты нити, $l_f$ , мм	17,25	26,51	20,95
Степень неоднородности филаментов, $C_L$ , %	19,02	1,12	1,12
Работа деформации до точки максимума, $W_{max}$ , Дж	95,97	112,48	179,89
Работа деформации до точки полного разрыва, $W_{полн}$ , Дж	204,88	127,9	202,52
Коэффициент реализации прочности нити, $K_p$			
– по модели (2)	0,69	0,95	0,96
– по модели (3)	0,71	0,98	0,98

циентом реализации прочности нити обладают ПП нити Heat-set и Frize. У нити VCF  $K_p$  значительно ниже, что обусловлено особенностями их получения.

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенного комплекса исследований:

- установлены показатели механических свойств ПП нитей различного способа получения;
- предложен новый методологический подход для определения коэффициента реализации прочности ПП нитей различного способа получения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перепёлкин, К.Е. (1991), Комплексная оценка качества и работоспособности нитей в процессах получения и переработки, *Химические волокна*, 1991, № 2, С. 45–56.
2. Перепёлкин, К.Е., Серков, А.Т., Иванцова, Т.М. (1989), *Дефектность и гетерогенность микроструктуры химических нитей и их влияние на свойства*, Москва, НИИТЭхим, 48 с.
3. Сорокин, Е.Я., Перепёлкин, К.Е. (1975), *Неравномерность свойств химических волокон*, Москва, НИИТЭхим, 32 с.
4. Перепёлкин, К.Е. (2005), Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства. Часть 1. Основные компоненты волокнистых композитов, их взаимодействие и взаимовлияние, *Химические волокна*, 2005, № 4, С. 7–22.
5. Перепёлкин, К.Е., Иванов, М.Н. (2008), Оценка механических свойств текстильных нитей с экспериментальными механическими характеристиками, *Сборник научных трудов по текстильному материаловедению, посвященный 100-летию со дня рождения А.Н. Соловьева*, Москва, МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008, С. 17–31.
6. Кузнецов, А.А. (2006), Прогнозирование степени поперечной гетерогенности неоднородности нитей (волокон) пучка, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2006, № 6, С. 17–21.
7. Кузнецов, А.А., Тхорева, И.М. (2009), Исследование влияния поперечной неравномерности показателей механических свойств на прочностные характеристики пучка текстильных нитей, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2009, № 16, С. 21–25.

## REFERENCES

1. Perepjolkin, K.E. (1991), The Complex estimation of quality and working capacity of threads in manufacture and processing processes [Kompleksnaja ocenka kachestva i rabotosposobnosti nitej v processah poluchenija i pererabotki], *Himicheskie volokna – Fibre chemistry*, 1991, № 2, pp. 45–56
2. Perepjolkin, K.E., Serkov, A.T., Ivancova, T.M. (1989), *Defektnost' i geterogennost' mikrostruktury himicheskikh nitej i ih vlijanie na svojstva*, [Presence of Defects and heterogeneity of a microstructure of chemical threads and their influence on properties], Moscow, Scientific research institute of technical and economic researches in a chemical complex, 48 p.
3. Sorokin, E.Ja., Perepjolkin, K.E. (1975), *Neravnomernost' svojstv himicheskikh volokon*, [Non-uniformity of properties of chemical fibres]. Moscow, Scientific research institute of technical and economic researches in a chemical complex, 32 p.
4. Perepjolkin, K.E. (2005), Polymeric fibrous composites, their principal views, manufacturing and property . A part 1. The basic components of fibrous composites, their interaction and interference [Polimernye voloknistye kompozity, ih osnovnye vidy, principy poluchenija i svojstva. Chast' 1. Osnovnye komponenty voloknistyh kompozitov, ih vzaimodejstvie i vzaimovlijanie], *Himicheskie volokna – Fibre chemistry*, 2005, № 4, pp.7–22.
5. Perepjolkin, K.E., Ivanov, M.N. (2008), Estimation of mechanical properties of textile threads with experimental mechanical characteristics [Ocenka mehanicheskikh svojstv tekstil'nyh nitej s jeksperimental'nymi mehanicheskimi harakteristikami], *Sbornik nauchnyh trudov po tekstil'nomu materialovedeniju, posvjashhennyj 100-letiju so dnja rozhdenija A.N. Solov'eva*, The

8. Кузнецов, А.А. (2010), Применение статической имитации испытания при изучении особенностей формирования и разрушения комплексных химических нитей, *Актуальные проблемы и направления развития материаловедения изделий сервиса, текстильной и легкой промышленности*, 2010, С. 100–111.
6. Kuznetsov, A.A. (2006), Forecasting of degree of cross-section heterogeneity of threads (fibres) of a bunch [Prognozirovanie stepeni poperechnoj geterogenosti raznodlinnosti nitej (volokon) puchka], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti – Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology*, 2006, № 6, pp. 17–21.
7. Kuznetsov, A.A., Thoreva, I.M. (2009), Research of influence of cross-section non-uniformity of indicators of mechanical properties on strength characteristics of a bunch of textile threads [Issledovanie vlijaniya poperechnoj neravnomernosti pokazatelej mehanicheskikh svojstv na prochnostnye harakteristiki puchka tekstil'nyh nitej], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Herald Vitebsk State Technological University*, 2009, № 16, pp. 21–25.
8. Kuznetsov, A.A. (2010), Application of static imitation of test at studying of features of formation and destruction of complex chemical threads [Primenenie staticheskoj imitacii ispytaniya pri izuchenii osobennostej formirovaniya i razrusheniya kompleksnyh himicheskikh nitej], *Actual problems and directions of development of materials technology of products of service, textile and light industry*, 2010, pp. 100–111.

Статья поступила в редакцию 20.11.2014 г.

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТРИКОТАЖНОГО КОМПРЕССИОННОГО РУКАВА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.Л. Надёжная, А.В. Чарковский, Н.Г. Луд,  
Е.А. Шляхтунов

УДК 677.075 : 61

### РЕФЕРАТ

*ТЕХНОЛОГИЯ, ИЗДЕЛИЕ ТРИКОТАЖНОЕ, ТРИКОТАЖ КОМПРЕССИОННЫЙ, ТРИКОТАЖ МЕДИЦИНСКИЙ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРИКОТАЖА, УПРУГИЕ ОБОЛОЧКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПРЕССИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ*

*Цель работы – создание конструкции трикотажного компрессионного рукава медицинского назначения, включая разработку модельного и размерного ряда изделий и методики проектирования лекал изделия по заданным величинам и распределению давления.*

*На основании медицинских требований определена конструкция трикотажного компрессионного рукава, состоящая из основной, верхней и нижней части. Разработан ассортимент трикотажных компрессионных рукавов, включающий различные модели, имеющие одинаковую по исполнению основную часть и отличающиеся друг от друга исполнением нижней части и наличием либо отсутствием дополнительных фиксаторов в верхней части. Выбраны размерные признаки для проектирования компрессионного рукава, разработан размерный ряд изделий, состоящий из восьми размеров: четырех групп по обхватам и двух групп по длине.*

*Разработана методика и компьютерная программа расчета ширины детали изделия по участкам и методика построения лекал, что позволяет проектировать компрессионный рукав по заданным величинам и распределению давления.*

### ABSTRACT

*TECHNOLOGY, COMPRESSION HOSIERY, MEDICAL HOSIERY, DEFORMATION PROPERTIES OF KNITTED FABRICS, ELASTIC SHELL, DESIGN OF COMPRESSION HOSIERY*

*This article is about development of construction of the medical compression arm sleeve for treating lymphedema, produced by cutting method. The development of the construction and technology of medical compression arm sleeve was based on the results of the theoretical and experimental research using the methods of mathematical modeling. Based on the medical requirements the design of the knitted compression sleeve was defined. Styles of arm sleeves and size range including four sizes and two lengths were developed. The method and the computer program for calculating the width of the product details on sites and the methods of construction of patterns that allows to design a compression sleeve to specify the values and distribution of pressure were developed.*

В настоящее время актуальной научной и практической задачей является разработка технологии производства отечественных компрессионных медицинских изделий для послеоперационной реабилитации женщин, больных раком молочной железы. В Республике Беларусь рак молочной железы в структуре женских онкологических заболеваний занимает первое место.

В последние годы в нашей стране наблюдается тенденция роста данного заболевания и ежегодно выявляется более 3,5 тысяч новых случаев заболеваемости. Применение различных методов лечения самого рака (хирургического, химиотерапии, лучевой терапии, гормонотерапии) приводит к такому распространенному осложнению, как лимфатический отек (вторичная лимфе-

дема) верхней конечности на стороне операции. Важным компонентом лечения лимфатических отеков является ношение специальных компрессионных изделий, задача которых – оказывать давление на руку в соответствии заданными медицинскими требованиями величинами и распределением вдоль конечности.

Компрессионное воздействие изделия на тело обеспечивается наличием эластомерных нитей в его структуре, придающих трикотажу необходимую жесткость и эластичность, а также тем, что размеры изделия в свободном состоянии меньше размеров тела, на которое его надевают. Как правило, компрессионное изделие представляет собой трубчатую оболочку переменного периметра. По способу производства компрессионные изделия бывают цельновязанные (бесшовные) и с продольным швом. Изделия с продольным швом могут изготавливаться кроеными из трикотажного полотна или вырабатываться в виде детали по контуру (регулярным способом) на плосковязальном оборудовании. В настоящей работе для изготовления трикотажного компрессионного рукава медицинского назначения выбран раскройный способ производства с использованием оборудования для изготовления трикотажных полотен и изделий бельевого назначения, содержащих эластомерные нити, позволяющий изготавливать компрессионные изделия на имеющемся на предприятиях Республики Беларусь оборудовании без его модернизации. Раскройный способ предполагает сначала изготовление трикотажного полотна с заданными свойствами, а затем выкраивание из него детали изделия и последующее ее соединение продольным швом. Достоинством раскройного способа является универсальность: из одного и того же трикотажного полотна можно изготавливать изделия различных моделей и размеров.

Целью настоящей статьи является разработка конструкции трикотажного компрессионного рукава медицинского назначения, включающая разработку модельного и размерного ряда изделий и методики проектирования лекал изделия по заданным величинам и распределению давления. Ранее разработана новая структура кулирного одинарного высокоэластичного трикотажа, обоснованы ее заправочные характе-

ристики, выполнены исследования деформационных свойств разработанного трикотажа при различных режимах деформирования [1–3].

В зависимости от локализации отека, его качественных и количественных характеристик возникает потребность в компрессионных рукавах различных моделей. Вне зависимости от модели в изделии можно выделить следующие структурные части:

- основная часть, которая представляет собой трубчатую конструкцию переменного периметра с продольным швом, покрывающая руку от запястья до подмышечной впадины;
- верхняя часть, содержащая узел крепления, препятствующий смещению рукава вниз вдоль конечности, а также, при необходимости, элементы, предназначенные для дополнительной поддержки плечевого сустава;
- нижняя часть, содержащая, при необходимости, элементы, оказывающие давление на область ладони и пальцев и препятствующие смещению изделия вверх вдоль конечности.

Главная функция компрессионного рукава обеспечивается за счет конструкции основной части изделия: переменного периметра на различных поперечных участках, определяемого в соответствии с размерными признаками конечности и требуемыми величинами давления. Величина максимального давления (на уровне запястья) определяется классом компрессии, а его распределение вдоль руки регламентируется медико-техническими требованиями. Изделия разных моделей отличаются различной конструкцией верхней и нижней частей.

На основании медицинских рекомендаций, а также анализа зарубежных аналогов компрессионных рукавов было выбрано четыре основных варианта конструкции нижней части изделия:

вариант 1: нижняя часть рукава соответствует уровню запястья и представляет собой отверстие для кисти руки (рисунок 1 а);

вариант 2: нижняя часть выполнена в виде полуперчатки с отверстием для большого пальца кисти и участком, покрывающим ладонную часть кисти, с отверстием для остальных пальцев (рисунок 1 б);

вариант 3: нижняя часть выполнена в виде полуперчатки с отдельным участком для большого

пальца с его частичным покрытием и участком, покрывающим ладонную часть кисти, с отверстием для остальных пальцев (рисунок 1 в);

вариант 4: нижняя часть выполнена в виде полуперчатки с разделенными пальцами, при этом она оставляет открытыми ногтевые и средние фаланги пальцев (рисунок 1 г).



Рисунок 1 – Варианты конструкции нижней части компрессионного рукава

Выбор конструкции нижней части изделия главным образом определяется локализацией отека, его качественной и количественной характеристикой. В случаях начальных стадий отека исполнение нижней части рукава возможно по варианту 1. Главным недостатком конструкции варианта 1 является отсутствие фиксации на руке нижней части изделия. В рукавах, нижняя часть которых исполнена согласно варианту 2 или 3 обеспечивается ее фиксация за счет отверстия для большого пальца или участка для большого пальца. Однако недостатками данных вариантов является отсутствие фиксации нижней части участка полуперчатки, покрывающего ладонную часть кисти. Вследствие движений кисти в процессе ношения рукава может происходить смещение нижней части полуперчатки вверх до основания большого пальца, при этом уменьшается компрессионное воздействие рукава на ладонную часть кисти. В случае, если требуется компрессионное воздействие на данную часть руки, этот недостаток является существенным. Для исключения данного недостатка используется конструкция рукава с разделенными пальцами (вариант г). При этом обеспечивается фиксация нижней части участка полуперчатки, покрывающего ладонную часть кисти, а также оказывается компрессионное воздействие на основные фаланги пальцев, которые также могут

быть подвержены лимфатическому отеку.

Конструкция верхней части компрессионного рукава выбиралась с учетом того, чтобы обеспечить надежную фиксацию изделия при максимальной комфортности ношения. Верхняя часть изделия (рисунок 2) представляет собой окат 1, переходящий в наплечник 2 с фиксатором 3. Фиксация рукава осуществляется за бретель бюстгалтера: конечная часть наплечника имеет загиб, который прикрепляют к нижележащему участку рукава с помощью контактной ленты «велькро» 4.

В процессе ношения рукава может происходить постепенное сползание наплечника и бретели бюстгалтера, за которую фиксируется изделие, вниз в сторону руки. Это вызывает дискомфорт при ношении, а также нарушение одной из функций наплечника – дополнительного поддержания и фиксации плечевого сустава. Для предотвращения сползания наплечник рукава может иметь крючок 5, к которому крепится дополнительный фиксатор в виде эластичной ленты 6, закрепленной вторым концом к другой бретели бюстгалтера. Дополнительный фиксатор может располагаться как спереди (со стороны груди), как показано на рисунке 2, так и сзади (со стороны спины) либо с обеих сторон.

Проектирование основной части компрессионного рукава заключается в построении такого контура лекал, чтобы после соединения изделия продольным швом и его надевания на конечность с размерными признаками, заданными при проектировании, обеспечивалось на каждом выбранном поперечном участке задан-

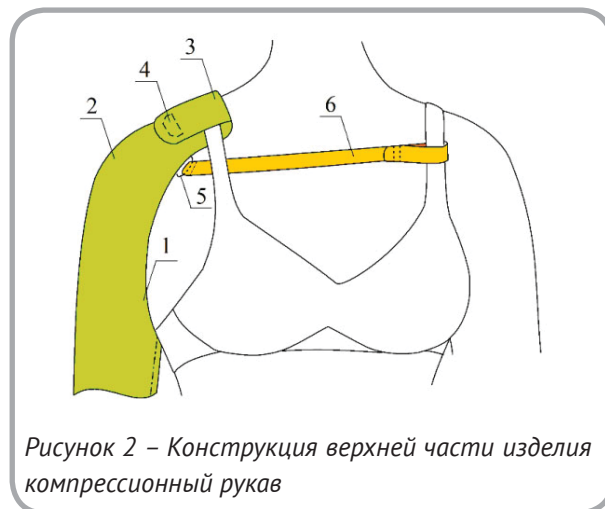


Рисунок 2 – Конструкция верхней части изделия компрессионный рукав

ное давление. Исходными данными для проектирования основной части компрессионного рукава являются: класс компрессии, в соответствии с которым определяется максимальное давление изделия (в области запястья), распределение давления вдоль конечности, размерные признаки конечности и зависимости между удельной нагрузкой и удлинением для трикотажного полотна.

На основании анализа зарубежных аналогов изделий [4–7], стандарта RAL-GZ 387/2 «Medical Compression Armsleeves. Quality Assurance» [8], а также размерных признаков, определяемых в соответствии с ГОСТ 17522–72 «Типовые фигуры женщин. Размерные признаки для проектирования одежды», в качестве размерных признаков при проектировании основной части компрессионного рукава были выбраны следующие (рисунок 3):

- обхват запястья ( $L_C$ ) – измеряется перпендикулярно оси предплечья по лучезапястному суставу;
- обхват предплечья ( $L_D$ ) – измеряется перпендикулярно оси предплечья в самой широкой его части;
- обхват плеча ( $L_G$ ) – измеряется перпендикулярно оси плеча, лента верхним краем должна касаться заднего угла подмышечной впадины;
- длина участка руки от запястья до предплечья ( $I_D$ );
- длина участка руки от запястья до плеча ( $I_G$ ).

Компрессионные рукава могут изготавливаться как по индивидуальным размерным признакам пациентов, так и определенных размеров в соответствии с размерным рядом. Изготовление компрессионных рукавов по индивидуальным размерам в производственных условиях проблематично, в связи с этим необходима разработка размерного ряда изделий. При разработке размерного ряда изделий анализировались размерные признаки пациентов, наблюдавшихся в УЗ «Витебский областной клинический онкологический диспансер», а также размерные ряды зарубежных аналогов, размерные данные по ГОСТ 17522–72 «Типовые фигуры женщин. Размерные признаки для проектирования одежды». В результате анализа установлено, что

величины размерных признаков пациентов и размерные признаки, соответствующие зарубежным аналогам изделий, существенно отличаются от размерных признаков типовых фигур. С учетом этого было принято решение проектировать изделия восьми размеров: четырех групп по обхватам и двух групп по длине.

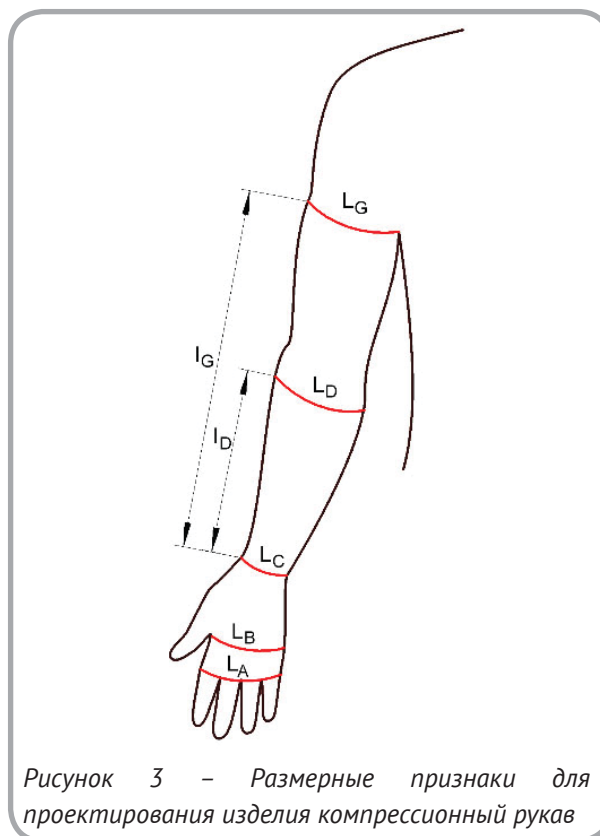


Рисунок 3 – Размерные признаки для проектирования изделия компрессионный рукав

Размер изделия определяет обхват запястья ( $L_C$ ) с интервалом безразличия 3 см и длина участка руки от запястья до плеча ( $I_G$ ) с интервалом безразличия 5 см. Остальные размерные признаки определяются в соответствии с таблицей 1.

Для проектирования основной части компрессионного рукава также необходимо задать величины давления на уровнях, соответствующих размерным признакам. Согласно медико-техническим требованиям, изделия по давлению должны соответствовать 1 и 2 классу компрессии, при этом давление на уровне запястья  $P_C$  должно составлять от 2 до 2,8 кПа для 1 класса компрессии и от 3,1 до 4,3 кПа для 2 класса компрессии. На уровнях предплечья и плеча давление  $P_D = \beta_D P_C$  и  $P_G = \beta_G P_C$ , где  $\beta_D$  и  $\beta_G$  – коэффициенты, характеризующие относи-



Таблица 1 – Величины размерных признаков компрессионного рукава, см

Обозначение размерного признака	Группа по обхватам (размер)			
	1	2	3	4
$L_c$	16–19	19–22	22–25	25–28
$L_D$	22–26	26–30	30–34	34–38
$L_G$	24–30	30–36	36–42	42–48
	Группа по длине (рост)			
	1		2	
$I_D$	16–18		18–20	
$I_G$	40–45		45–50	

тельное уменьшение давления на уровне предплечья и плеча соответственно по сравнению с давлением на уровне запястья.

Для расчета зависимости между давлением и нагрузкой на уровнях запястья, предплечья и плеча на этапе проектирования изделия используется следующая формула [8]:

$$P_i = 20\pi \frac{f_i}{L_i}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – давление, оказываемое изделием на участке  $i$ , кПа;  $f_i$  – величина удельной нагрузки при растяжении трикотажа на участке  $i$ , Н/см;  $L_i$  – обхват тела на участке  $i$ , см.

Данная формула позволяет определить при заданном давлении величину удельной нагрузки трикотажного полотна. Для определения линейных размеров основной части рукава необходимо определить величину относительного удлинения трикотажа, соответствующую рассчитанному значению удельной нагрузки. Зависимость удлинения трикотажного полотна от удельной нагрузки определяется по результатам полуцикловых испытаний образцов трикотажного полотна на растяжение вдоль петельных рядов (диаграммам растяжения). Для аналитического описания зависимости удлинения трикотажного полотна  $\varepsilon$  от удельной нагрузки  $f$ , Н/м, предлагается использовать математическую модель следующего вида:

$$\varepsilon = A(1 - e^{-Bf}), \quad (2)$$

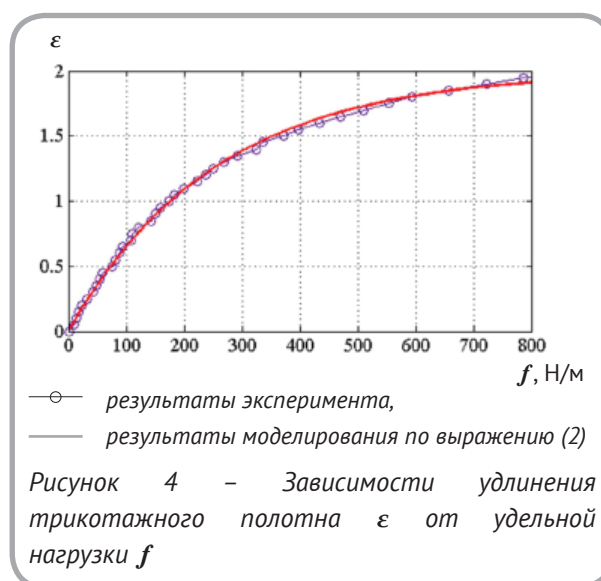
где  $A, B$  – коэффициенты модели.

В результате математического моделирования зависимости удлинения от удельной нагрузки  $f$ , Н/м (рисунок 4) для одинарного трикотажного полотна получены следующие значения коэффициентов модели (2):  $A = 2$ ,  $B = 3,941 \cdot 10^{-3}$  м/Н; значение достоверности  $R^2 = 0,99$ .

Таким образом, для построения лекал изделия необходимо рассчитать ширину детали изделия на уровнях запястья, предплечья и плеча по заданным величинам давления и размерам конечности.

Методика проектирования лекал компрессионного рукава включает расчет ширины детали изделия и построение по полученным данным контура лекал.

Расчет ширины детали изделия на уровнях



запястья, предплечья и плеча можно привести к ряду формализованных шагов.

1. Задание максимальных давлений (на уровне запястья)  $P_{Ck}$ , кПа, где  $k$  – класс компрессии изделия.

2. Задание коэффициентов, характеризующих относительное уменьшение давления на уровне предплечья  $\beta_D$  и плеча  $\beta_G$  по сравнению с давлением на уровне запястья.

3. Вычисление значений давления на уровне предплечья  $P_{Dk}$  и плеча  $P_{Gk}$ , кПа.

4. Задание массива размерных признаков конечности  $L$ , см, в виде  $L = [L_{Ci}; L_{Di}; L_{Gi}]$ , где  $i$  – номер группы изделия по обхватам.

5. Расчет массива значений удельных нагрузок на уровне запястья, предплечья и плеча для всех размеров и классов компрессии  $f = [f_{Cik}; f_{Dik}; f_{Gik}]$  по формуле

$$f = \frac{5P \cdot L}{\pi} \quad (3)$$

6. Расчет массива рабочих удлинений изделия  $\epsilon$  на уровне запястья, предплечья и плеча для всех размеров и классов компрессии путем подстановки массива значений удельных нагрузок в выражение (2).

7. Расчет массива ширины детали изделия на уровне запястья, предплечья и плеча для всех размеров и классов компрессии:  $L_0 = L / (1 + \epsilon)$ .

На языке «Matlab» разработана программа расчета параметров лекал. С использованием данной программы рассчитаны ширины  $L_0$  деталей изделий 1 и 2 класса компрессии на уровнях запястья  $L_{0C}$ , предплечья  $L_{0D}$  и плеча  $L_{0G}$ , результаты расчета представлены в таблице 2.

Построение лекал основной части детали изделия осуществляется в следующей последовательности.

1. Проводится осевая линия  $CG$  (рисунок 5), длина которой соответствует длине участка руки от запястья до плеча ( $I_C$ ).

2. От точки  $C$  откладываются отрезки, равные половине ширины изделия на уровне запястья  $CC_1 = CC_2 = L_{0C} / 2$ .

3. Определяется линия предплечья  $D_1D_2$  с учетом группы изделия по длине: отрезок  $CD = I_D$ .

4. От точки  $D$  откладываются отрезки, равные половине ширины изделия на уровне предплечья  $DD_1 = DD_2 = L_{0D} / 2$ .

5. От точки  $G$  откладываются отрезки, равные половине ширины изделия на уровне плеча  $GG_1 = GG_2 = L_{0G} / 2$ .

Проектирование верхней части детали компрессионного рукава заключается в построении конструкции оката, переходящего в наплечник, который должен иметь фиксатор. Окат рукава выполняется на базе конструкции оката втачного рукава трикотажного изделия, симметричным относительно продольной оси. За основу взята конструкция передней части оката втачного рукава трикотажного изделия [9], построенная с учетом ширины лекала компрессионного рукава на уровне плеча. Высоту оката  $GH$  необходимо увеличить на 10 см для формирования наплечника и размещения на нем фиксатора за бретель бюстгалтера. Контур оката очерчивается плавной кривой, по аналогии с окатом втачного рукава.

Для рукавов с полуперчаткой (варианты б–г) необходимо построение нижней части детали изделия. Ширина детали изделия в нижней части определяется по той же методике, что и ширина основной части детали изделия с учетом обхвата кисти на уровне основания большого пальца ( $L_B$ ) и обхвата кисти на уровне основания пальцев ( $L_A$ ) и рекомендуемого давления в области кисти. В случае исполнения нижней части по варианту 2 в продольном шве рукава выполняется отверстие под большой палец кисти (рисунок 5). Расположение отверстия относительно продольного шва зависит от того, для какой руки – правой либо левой предназначен компрессионный рукав. В изделии, нижняя часть которого выполнена по варианту 3, ширина детали компрессионного рукава в нижней части увеличивается на ширину участка большого пальца. Для отделения участка большого пальца от участка ладони выполняется продольный разрез.

## ВЫВОДЫ

1. На основании медицинских требований определена конструкция трикотажного компрессионного рукава, состоящая из следующих структурных частей: основной части, которая представляет собой трубчатую оболочку пере-

Таблица 2 – Результаты расчета ширины детали изделия 1 и 2 класса компрессии

Класс компрессии	Ширина детали изделия, см				
		Группа по обхватам			
		1	2	3	4
1	$L_{0C}$	12,0	13,4	14,8	16,0
	$L_{0D}$	16,6	18,6	20,4	22,2
	$L_{0G}$	20,8	24,4	27,6	30,6
2	$L_{0C}$	10,6	11,8	12,8	13,8
	$L_{0D}$	14,6	16,2	17,8	19,2
	$L_{0G}$	18,8	21,6	24,4	26,8

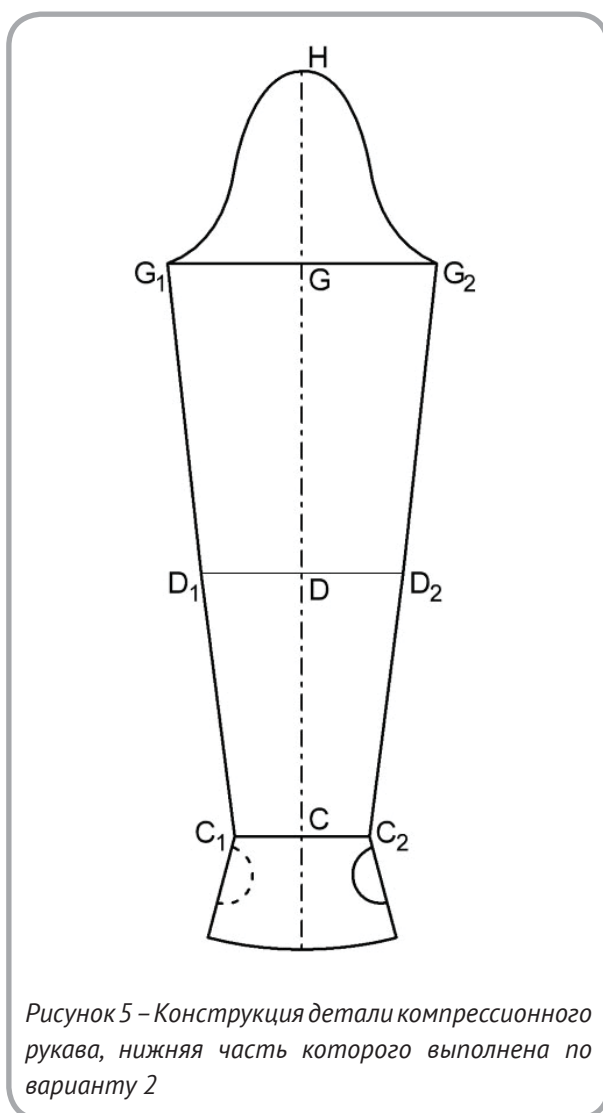


Рисунок 5 – Конструкция детали компрессионного рукава, нижняя часть которого выполнена по варианту 2

менного периметра с продольным швом, покрывающую руку от запястья до подмышечной впадины; верхней части, содержащей узел крепления, препятствующий смещению рукава вниз вдоль конечности, а также, при необходимости, элементы, предназначенные для дополнительной поддержки плечевого сустава; нижней части, содержащей, при необходимости, элементы, оказывающие давление на область ладони и пальцев и препятствующие смещению изделия вверх вдоль конечности.

2. Разработан ассортимент трикотажных компрессионных рукавов, включающий различные модели, имеющие одинаковую по исполнению основную часть и отличающиеся друг от друга исполнением нижней части и наличием либо отсутствием дополнительных фиксаторов в верхней части.

3. Выбраны размерные признаки для проектирования компрессионного рукава, разработан размерный ряд изделий, состоящий из восьми размеров: четырех групп по обхватам и двух групп по длине.

4. Разработана методика и компьютерная программа расчета ширины детали изделия по участкам и методика построения лекал, что позволяет проектировать компрессионный рукав по заданным величинам и распределению давления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кулирный одинарный высокоэластичный трикотаж: пат. 17875, МПК7 D 04 B 1/18 / Н.Л. Надёжная, А.В. Чарковский, Н.Г. Луд, Е.А. Шляхтунов, Д.В. Евдокимов; заявитель Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» – № а 20111009 ; заявл. 18.07.2011 ; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 115.
2. Надёжная, Н.Л., Чарковский, А.В. (2013), Проектирование параметров петельной структуры кулирного одинарного трикотажа с эластомерными нитями, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2012, Вып. 23, С. 46-54.
3. Надёжная, Н.Л., Кузнецов, А.А., Чарковский, А.В. (2013), Прогнозирование деформационных свойств трикотажа для компрессионных изделий, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2013, Вып. 24, С. 48-55.
4. Трикотаж для лимфологии // Ортопедические салоны medi [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://medi.ua/popularProduction/katalog-kompress-trikotag-dlya-limfologii/> – Дата доступа : 10.07.2012.
5. Лечебные компрессионные рукава и перчатки SIGVARIS // Медицинский компрессионный трикотаж SIGVARIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.sigvaris.ru/patient/sigprodoover/sigarmsleev/> – Дата доступа : 12.07.2011.
6. VENOSAN arm sleeves and gloves: prospectus // VENOSAN Compression stockings [Electronic resource]. – Mode of access : [http://www.venosan.com/index\\_en.php?TPL=3401&x3000\\_Open=227](http://www.venosan.com/index_en.php?TPL=3401&x3000_Open=227). – Date of access : 12.07.2012.

## REFERENCES

1. Nadyozhnaya, N.L., Charkovsky, A.V., Lud, N.G., Shljahtunov, E.A., Evdokimov, D.V. (2011) Single jersey elastomeric [Kulirnyj odinarnyj vysokojelastichnyj trikotazh], BY 17875, D 04 B 1/18, Assignee Vitebsk State Technological University; Date of Patent: 18.07.2011, Official bulletin of the National Center of Intellectual Property, 2013, № 6, p. 115.
2. Nadyozhnaya, N.L., Charkovsky, A.V. (2012), Design parameters of looped structure of single jersey knitted fabric with elastomeric yarns [Proektirovanie parametrov petel'noj struktury kulirnogo odinarnogo trikotazha s jelastomernymi nitjami], *Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2012, № 23, pp. 46-54.
3. Nadyozhnaya, N.L., Kuznetsov, A.A., Charkovsky, A.V. (2013), Prediction of deformation properties of knitwear for compression goods [Prognozirovanie deformacionnyh svojstv trikotazha dlja kompressionnyh izdelij], *Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2013, № 24, pp. 48-55.
4. Trikotazh dlja limfologii // Ortopedicheskie salony medi [Knit for limfology] (2012), available at: <http://medi.ua/popularProduction/katalog-kompress-trikotag-dlya-limfologii/> (accessed 10 July 2012).
5. Lechebnye kompressionnye rukava i perchatki SIGVARIS // Medicinskij kompressionnyj trikotazh SIGVARIS [Medical compression arm sleeves SIGVARIS // Medical compression hosiery SIGVARIS] (2011), available at: <http://www.sigvaris.ru/patient/sigprodoover/sigarmsleev/> (accessed 12 July 2011).
6. VENOSAN arm sleeves and gloves: prospectus // VENOSAN Compression stockings, (2012), available at: [http://www.venosan.com/index\\_en.php?TPL=3401&x3000\\_Open=227](http://www.venosan.com/index_en.php?TPL=3401&x3000_Open=227) (accessed 12 July 2012).

- |  |  |
|--|--|
| <p>7. Arm Care therapeutic // SOLIDEA [Electronic resource]. – Mode of access : <a href="http://www.solidea.com/it/therapeutic/bracciali-arm-care-therapeutic/">http://www.solidea.com/it/therapeutic/bracciali-arm-care-therapeutic/</a> : 12.07.2012.</p> <p>8. Medical Compression Armsleeves. Quality Assurance : RAL-GZ 387/2. – Edition January 2008. – Deutsches Institute Für Gütesicherung Und Kennzeichnung E. V., 2008. – 17 p.</p> <p>9. Трутченко, Л.И., Наурзбаева, Н.Х., Овчинникова, И.П. (2003), <i>Конструирование нетрадиционных швейных изделий</i>, Витебск, 2003, 150 с.</p> | <p>7. Arm Care therapeutic // SOLIDEA, (2012), available at: <a href="http://www.solidea.com/it/therapeutic/bracciali-arm-care-therapeutic/">http://www.solidea.com/it/therapeutic/bracciali-arm-care-therapeutic/</a> (accessed 12 July 2012).</p> <p>8. Medical Compression Armsleeves. Quality Assurance : RAL-GZ 387/2. – Edition January 2008. – Deutsches Institute Für Gütesicherung Und Kennzeichnung E. V., 2008. – 17 p.</p> <p>9. Trutchenko, L.I., Naurzbaeva, N.H., Ovchinnikova, I.P. (2003), <i>Konstruirovaniye netraditsionnyh shvejnyh izdelij</i> [Construction of non-traditional garments], Vitebsk, Educational Institution Vitebsk State Technological University, 150 p.</p> |
|--|--|

*Статья поступила в редакцию 20.09.2014 г.*

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЯЖЕНИЯ И РАЗРЫВА ПУЧКА ВОЛОКОН

Е.В. Назаренко, Д.Б. Рыклин, С.В. Соколов

УДК 677.017.31

### РЕФЕРАТ

*ПУЧОК ВОЛОКОН, РАСТЯЖЕНИЕ ПУЧКА ВОЛОКОН, РАЗРЫВ ПУЧКА ВОЛОКОН, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ДЕФОРМАЦИЯ, ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ, КРИВАЯ «НАГРУЗКА-УДЛИНЕНИЕ», КОЭФФИЦИЕНТ ВАРИАЦИИ*

*Целью работы является разработка имитационной модели процесса растяжения и разрыва пучка однородных волокон для оценки влияния физико-механических свойств волокон на неодновременность их разрыва и для возможности последующего использования полученной модели при прогнозировании прочностных характеристик пряжи.*

*Проведено имитационное моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон на основе данных о растяжении единичных волокон. В результате исследований установлено, что существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает коэффициент вариации по относительному удлинению, с увеличением которого разрывная нагрузка пучка волокон уменьшается, полное удлинение, соответствующее разрывной нагрузке пучка, уменьшается и возрастает начальный модуль упругости.*

Задача проектирования прочностных характеристик продуктов прядильного производства является одной из главных задач, поскольку показатель разрывной нагрузки позволяет осуществлять контроль качества производства и рассчитывать разрывные характеристики тканей [1].

Существующие методики прогнозирования прочности основаны на использовании эмпирических моделей, отражающих результаты эксперимента в конкретных производственных условиях, либо теоретических моделей, область применения которых ограничивается сложной структурой и использованием параметров, сложно определяемых в реальных условиях. Кроме того, используются полуэмпирические модели,

### ABSTRACT

*FIBER BUNDLE, EXTENSION OF THE FIBER BUNDLE, BREAK OF THE FIBER BUNDLE, IMITATING MODEL, DEFORMATION, DIAGRAM OF AN EXTENSION, LOAD-ELONGATION CURVE, COEFFICIENT OF VARIATION*

*The most important mechanical properties of fibers are their tensile properties under forces and deformations applied along the fiber axis. Of these, the simplest to study experimentally is the elongation and finally the break.*

*The behaviour of an individual fiber under a gradually increasing applied force is completely expressed by the load-elongation curve with its endpoint breakage. An advantage of a bundle test is that it takes account of variability, which influences on yarn strength.*

*As a result of the analytical researches imitating model of extension and break of the fiber bundle was developed. It was found that the coefficient of variation of elongation at breaking affects on the form of the diagram of extension of the fiber bundle.*

коэффициенты которых имеют определенный физический смысл. Однако для их получения необходимо проведение большого количества экспериментов.

Новейшие информационные технологии позволяют более точно прогнозировать прочностные характеристики продуктов прядильного производства. Поэтому создание современной методики прогнозирования, основанной как на теоретическом, так и на экспериментальном материале с применением методов компьютерного моделирования, является актуальной научной и практической задачей.

Целью работы является разработка математической модели процесса растяжения и разры-

ва пучка однородных волокон для оценки влияния физико-механических свойств волокон на неравномерность их разрыва. Выполнение поставленной задачи позволит в дальнейшем использовать полученную модель при прогнозировании прочности пряжи. Использование метода имитационного моделирования испытаний дает возможность представить изучаемый процесс в целом и найти общие закономерности.

Деформирование пучка волокон происходит по закономерностям, близким к деформированию отдельных волокон [2]. Однако между этими закономерностями имеются и различия, определяемые различиями в свойствах и расположении волокон в пучке и фрикционным взаимодействием между ними.

В работе Перепелкина К.Е. [2] приведены диаграммы растяжения отдельных волокон, усредненная диаграмма их растяжения и диаграмма растяжения пучка невзаимодействующих друг с другом волокон. Диаграмма растяжения пучка расположена ниже, чем усредненная диаграмма отдельных волокон, ее начальная часть соответствует более низким значениям модуля деформации. Существенным отличием диаграммы растяжения пучка волокон является наличие правой нисходящей ветви, зависящей от неравномерности деформирования и разрушения волокон. Максимум диаграммы растяжения пучка ( $\sigma_{п}$ ) расположен ниже, чем величина среднего разрушающего напряжения волокон ( $\sigma_B$ ). Это различие учитывается коэффициентом использования прочности волокон в пучке:

$$\chi = \frac{\sigma_{п}}{\sigma_B} \quad (1)$$

Величина коэффициента использования прочности волокон в пучке всегда меньше единицы и существенно зависит от характера их деформирования и разрушения. Обычно для пучка волокон или некрученной комплексной нити она заключается в пределах от 0,6 до 0,95.

Суммарная работа деформирования до разрыва отдельных волокон и их пучка равны. Следствием этого является равенство площадей под кривыми для усредненной диаграммы растяжения волокон и пучка.

Процесс растяжения волокон и нитей хорошо

описывается диаграммами растяжения, на оси абсцисс которых откладываются значения абсолютных или относительных удлинений, а на оси ординат соответствующие им нагрузки (напряжения).

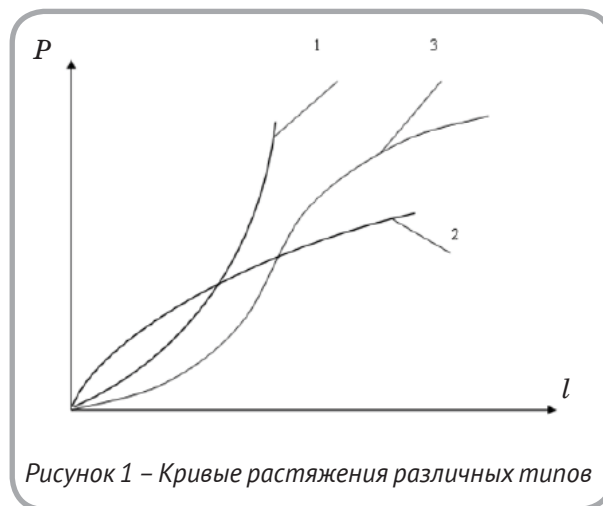


Рисунок 1 – Кривые растяжения различных типов

Из всего многообразия кривых растяжения можно выделить три основных типа [3]:

- тип 1 – таким волокнам и нитям присущи небольшие деформации при высокой прочности, элементы структуры относительно хорошо ориентированы;
- тип 2 – типичным являются большие растяжения и различные прочности, в зависимости от структуры;
- тип 3 – образование кривых этого типа обусловлено тем, что в начале растяжения происходит ориентация структурных элементов, а затем разрушение сложившейся и образование новой структуры, при которой деформация сильно увеличивается.

Для волокон и нитей, состоящих из целлюлозы (натуральных и упрочненных искусственных), характерен первый тип кривых растяжения, для шелка, шерсти и простых искусственных – второй тип, а для ряда химических – третий тип кривых.

Математическое определение зависимости нагрузки (напряжения) от приложенного абсолютного или относительного удлинения позволит моделировать кривые растяжения волокон различных типов, что даст возможность в последующем проводить моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон.

В большинстве случаев деформационные

свойства текстильных материалов оцениваются на основании эмпирического анализа экспериментальных данных. Но, как показывает практика, данный метод исследования обладает рядом существенных недостатков, к которым относятся отсутствие физического обоснования получаемых зависимостей и физического смысла отдельных коэффициентов моделей, а также значительные временные затраты по экспериментальному определению параметров получаемых моделей.

С целью исключения вышеизложенных недостатков моделей профессором Кузнецовым А.А. в работе [4] была предложена универсальная математическая модель следующего вида:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b_0 + b_1 \varepsilon} + b_2 \varepsilon^2, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па;  $\varepsilon$  – относительное удлинение;  $b_0, b_1, b_2$  – параметры модели.

В работе [5] определен физический смысл используемых в модели параметров. Параметр  $b_0$  характеризует упругие свойства волокна (нити) при растяжении, параметр  $b_1$  характеризует пластические свойства волокна, параметр  $b_2$  характеризует упрочняющие свойства волокна:

$$b_0 = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} = \frac{1}{E_y}, \quad b_1 = \frac{1}{\sigma_n} - \frac{1}{\sigma_y}, \quad b_2 = \frac{\sigma_p - \sigma_n}{\varepsilon_p^2} = \frac{\Delta\sigma_{упр}}{\varepsilon_p^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_y$  – условный предел упругости или напряжение, при котором произошло бы разрушение абсолютно упругой нити, Па;  $\varepsilon_p$  – относительное разрывное удлинение, %;  $E_y$  – условный модуль упругости, Па;  $\sigma_n$  – условный предел пластичности или напряжение, при котором произошло бы разрушение не упрочняющейся нити, Па;  $\sigma_{упр}$  – условный предел упрочнения волокна (нити), Па;  $\sigma_p$  – разрывное напряжение волокна (нити), Па.

С целью определения численных значений параметров модели  $b_0, b_1, b_2$  для исследуемых образцов волокон (хлопкового, льняного, вискозного, полиэфирного) был использован специальный пакет Curve Fitting Toolbox программной среды MatLab, который позволяет приближать данные при помощи параметрических моделей.

В качестве исходных данных вводились параметры кривых растяжения различных волокон, приведенные в литературных источниках [6, 7]. По этим данным проводилось построение диаграмм растяжения и приближение к ним кривой, построенной по математической модели (2), с одновременным подбором параметров модели. Критерием точности такого приближения служило значение коэффициента детерминации R2.

В таблице 1 приведены значения параметров  $b_0, b_1, b_2$  для различных видов волокон, а также разрывное удлинение  $\varepsilon_p$  и разрывное напряжение  $\sigma_p$ , полученные из справочников.

Для возможности моделирования диаграмм растяжения для случайных значений разрывного удлинения и разрывного напряжения можно предложить использование масштабных коэффициентов. В этом случае математическое выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{p0} = \frac{1}{K_1} \left( \frac{K_2 \cdot \varepsilon_{p0}}{b_0 + b_1 \cdot K_2 \cdot \varepsilon_{p0}} + b_2 \cdot (K_2 \cdot \varepsilon_{p0})^2 \right), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{p0}$  – случайное (задаваемое) разрывное удлинение, %;  $\sigma_{p0}$  – случайное (задаваемое) разрывное напряжение, Па;  $K_1, K_2$  – масштабные коэффициенты:

$$K_1 = \frac{\sigma_p}{\sigma_{p0}}, \quad K_2 = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{p0}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_p$  – табличное значение разрывного удлинения, %;  $\sigma_p$  – табличное значение разрывного напряжения, Па (таблица 1).

На основании формулы (4) по данным таблицы 1 могут быть построены кривые растяжения при различных значениях разрывного удлинения и разрывного напряжения.

На основании полученных данных о разрыве единичных волокон была разработана программа по моделированию разрыва пучка волокон.

В окне «Данные» осуществляется ввод параметров: количество волокон в пучке (содержание), тип волокон (хлопковое, вискозное, льняное, полиэфирное), тип и параметры случайного распределения значений разрывного удлинения и разрывной нагрузки (постоянное значение, нормальный закон и Вейбулла).



Таблица 1 – Характеристики разрыва и параметры модели для различных видов волокон

Тип волокна	$\varepsilon_p, \%$	$\sigma_p, \cdot 10^7 \text{ Па}$	$b_0, \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$	$b_1, \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$	$b_2, \cdot 10^7 \text{ Па}$	$R^2$
Хлопковое	5,2	35,8	0,07108	0,09457	0,9784	0,9976
Вискозное	27,5	28,5	0,3864	0,03122	0,008134	0,9994
Льняное	3	76,8	0,07713	0,0481	6,859	0,9958
Полиэфирное	21	55	0,122	0,014	0,013	0,9983

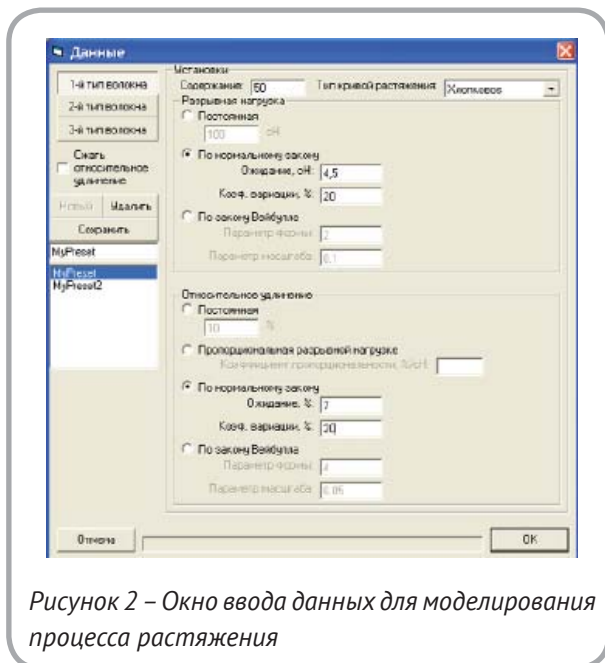


Рисунок 2 – Окно ввода данных для моделирования процесса растяжения



Рисунок 3 – Результаты моделирования разрыва пучка хлопковых волокон

1 – кривая растяжения пучка волокон;  
2 – ломаная, соединяющая точки разрыва

По окончании ввода данных по ним создается пучок волокон и проводится моделирование его разрыва. После выполнения необходимых расчётов выводится кривая разрыва. Под графиком указывается максимальное усилие ( $P_{max}$ ), приложенное к пучку и соответствующее его разрывной нагрузке, и удлинение, а также значения удлинения и усилия, при которых произошел разрыв последнего волокна.

По оси абсцисс диаграммы растяжения откладывается удлинение в процентах, по оси ординат – приложенная нагрузка в сН.

В программе выполняются следующие основные операции: сортировка волокон по возрастанию их разрывного удлинения; расчет приложенного к сечению усилия, при котором произойдет разрыв данного волокна; построение диаграммы растяжения по полученным данным.

Поскольку известны разрывная нагрузка и разрывное удлинение каждого волокна, рас-

пределенные в соответствии с выбранным законом, рассчитывается приложенная к каждому из них нагрузка, соответствующая относительному удлинению пучка в данный момент.

Нагрузка, приложенная к пучку, в каждый момент времени равна сумме усилий, приложенных к каждому из неразорвавшихся волокон в его сечении:

$$P = \sum_{i=m+1}^n P_i, \quad (6)$$

где  $P_i$  – усилие, приложенное к  $i$ -му волокну;  $m$  – количество разорвавшихся волокон;  $n$  – количество волокон в сечении.

Для получения результата моделирования достаточно рассчитать нагрузку по формуле (6) при каждом удлинении пучка без учета разорвавшихся волокон, то есть тех, разрывное удлинение которых меньше текущего удлинения пучка. Таким образом происходит моделирование

растяжения и разрыва пучка волокон заданного типа.

Полученная имитационная модель позволяет определить степень влияния вариации между волокнами пучка относительного удлинения и разрывной нагрузки.

В ходе моделирования выявлено, что вариации значений разрывной нагрузки, распределенной по нормальному закону, не оказывают влияния на форму кривой растяжения пучка и суммарную разрывную нагрузку волокон (рисунок 4). При изменении коэффициента вариации по разрывной нагрузке  $CV_p$  от 0 до 30 % вариация разрывной нагрузки пучка оказалась незначительной и составила 2,82 %.

Существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает изменение коэффициента вариации по относительному удлинению. В

процессе имитационного моделирования выявлено, что с увеличением коэффициента вариации  $CV_\epsilon$  от 0 до 30 % разрывная нагрузка пучка уменьшалась от 516,79 сН до 237,88 сН (вариация составила 25 %). Полученная зависимость представлена графически на рисунке 5.

Кроме вышесказанного, при изменении коэффициента вариации  $CV_\epsilon$  изменяется начальный модуль упругости и полное удлинение при разрыве (рисунок 6).

Отмечено, что с увеличением коэффициента вариации по относительному удлинению  $CV_\epsilon$  от 0 до 30 % угол наклона касательной к кривой растяжения в начале координат, соответствующий начальному модулю упругости, увеличивается в 1,3 раза, а полное удлинение, соответствующее разрывной нагрузке пучка, уменьшается с 6,2 до 4,4 %.

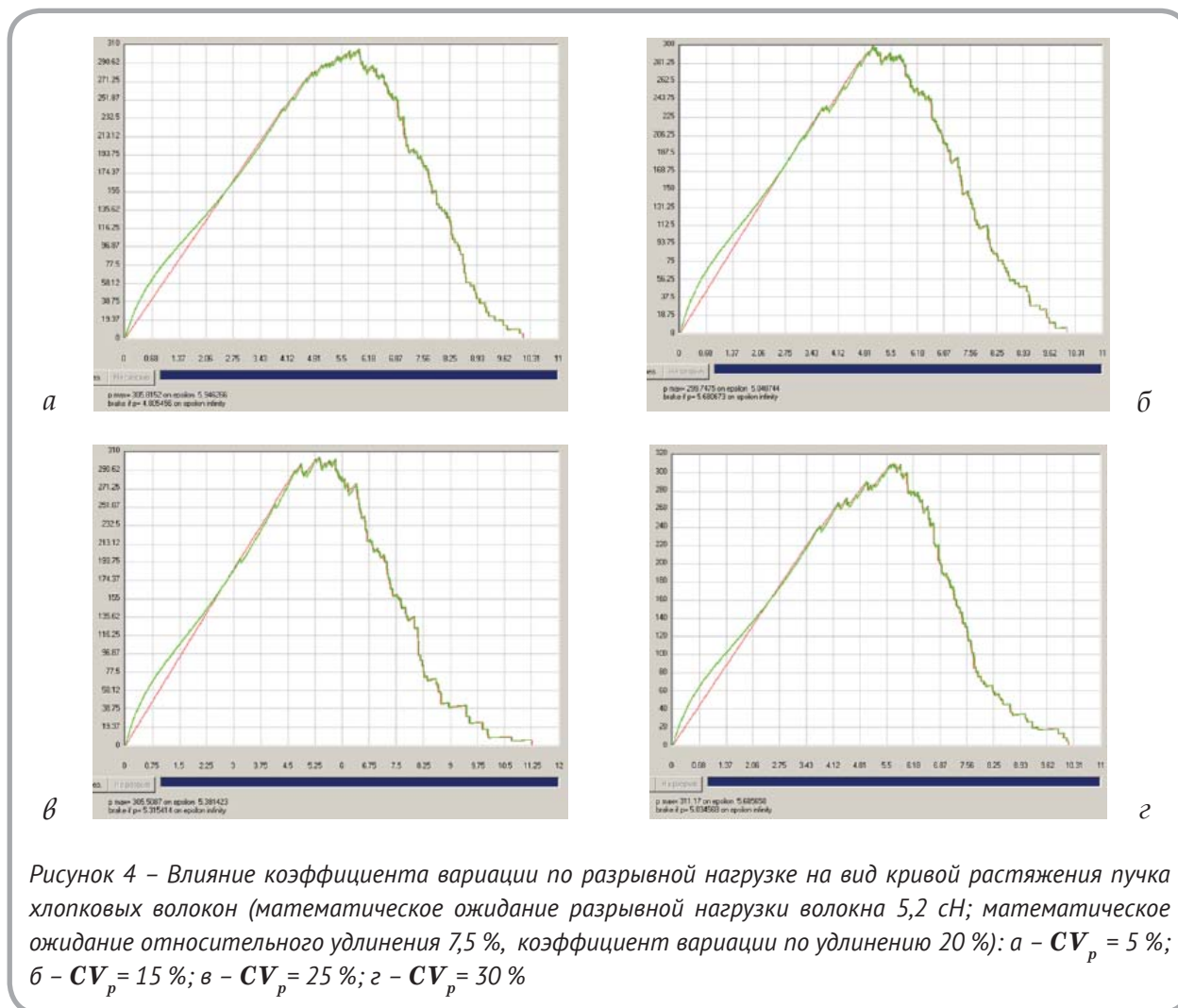
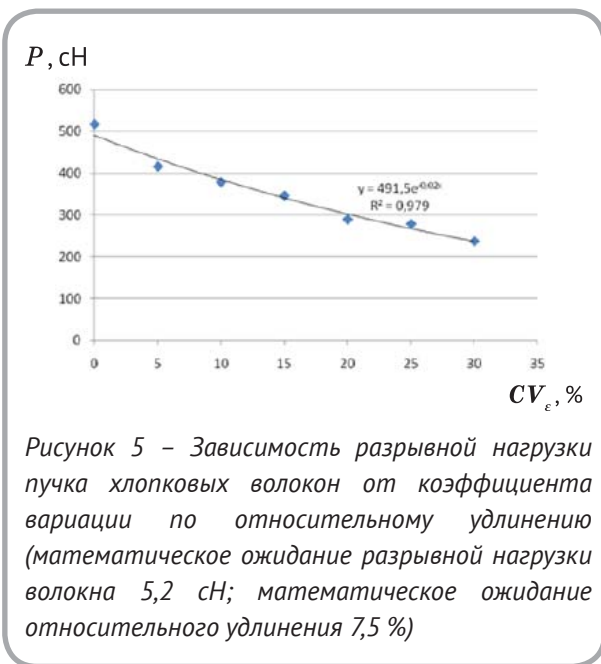
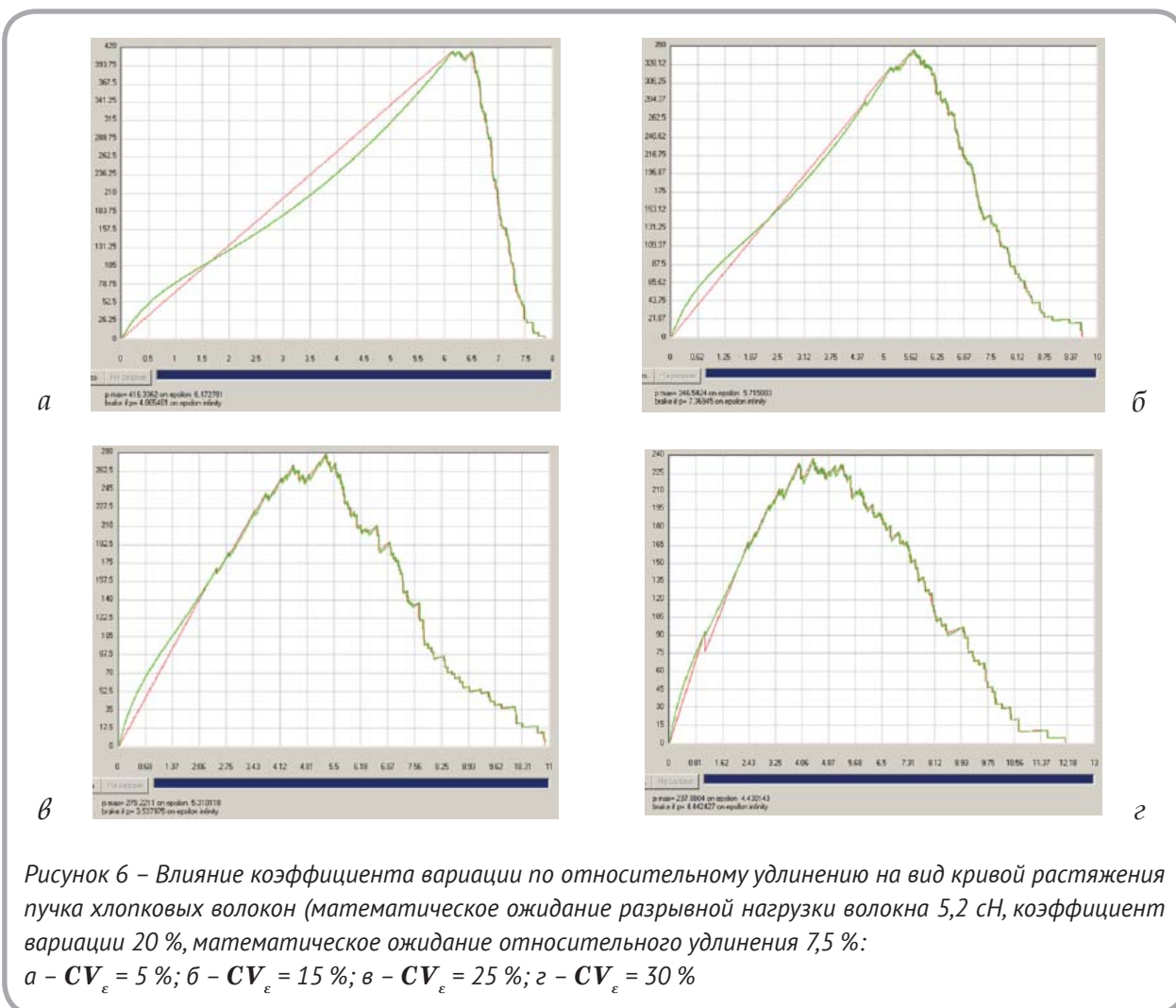


Рисунок 4 – Влияние коэффициента вариации по разрывной нагрузке на вид кривой растяжения пучка хлопковых волокон (математическое ожидание разрывной нагрузки волокна 5,2 сН; математическое ожидание относительного удлинения 7,5 %, коэффициент вариации по удлинению 20 %): а –  $CV_p = 5 \%$ ; б –  $CV_p = 15 \%$ ; в –  $CV_p = 25 \%$ ; г –  $CV_p = 30 \%$



**ВЫВОДЫ**

1. Разработана модель процесса растяжения волокон различных типов (хлопкового, вискозного, льняного, полиэфирного) с построением диаграмм растяжения. При помощи прикладного пакета Curve Fitting Toolbox определены параметры универсальной математической модели. Полученные зависимости необходимы для повышения точности имитационного моделирования деформирования пучка волокон.
2. Получена имитационная модель процесса растяжения и разрыва пучка волокон на основе данных о растяжении единичных волокон. Проведено исследование влияния вариации между волокнами пучка разрывной нагрузки и разрывного удлинения. Установлено, что существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает коэффициент вариации



по относительному удлинению, с увеличением которого от 0 до 30 % разрывная нагрузка пучка хлопковых волокон уменьшается от 516,79 сН до 237,88 сН, полное удлинение уменьшается с 6,2 до 4,4 % и возрастает начальный модуль упругости.

3. Полученная модель может быть использована при дальнейшем проведении работ по созданию методики прогнозирования физико-механических свойств пряжи.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыклин, Д. Б. (2010), *Технология и оборудование для приготовления волокнистого настила*, Витебск, ВГТУ, 239 с.
2. Перепелкин, К. Е., Лебедева, Г.Г. (1968), *Методы исследования свойств волокон и нитей*, Ленинград, 79 с.
3. Давыдов, А.Ф. (1997), *Текстильное материаловедение*, Москва, Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, 168 с.
4. Кузнецов, А.А., Ольшанский В.И. (2004), *Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей*, Витебск, ВГТУ, 225 с.
5. Кузнецов, А.А. (2007), Прогнозирование показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полциклового испытания на растяжение, *Вестник ВГТУ*, Витебск, 2007, № 12, С. 36-41.
6. Кукин, Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. (1989), *Текстильное материаловедение (волокна и нити)*, Москва, 352 с.
7. Morton, W.E., Hearle, J.W.S. (2008), *Physical properties of textile fibres*, England, Cambridge, p 765.

#### REFERENCES

1. Ryklin, D.B. (2010), *Tehnologija i oborudovanie dlja prigotovlenija voloknistogo nastila* [Technology and equipment for card mat manufacturing], Vitebsk, UO Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet - Educational Institution Vitebsk State Technological University, 239 p.
2. Perepelkin, K. E., Lebedeva, G.G. (1968), *Metody issledovanija svojstv volokon i nitej* [Methods of investigating the properties of fibers and yarns], Leningrad, 79 p.
3. Davydov, A.F. (1997), *Tekstil'noe materialovedenie* [Textile materials science], Moscow, Rossijskij zaochnyj institut tekstil'noj i legkoj promyshlennosti - Russian Correspondence Institute of Textile and Light Industry, 168 p.
4. Kuznetsov, A.A., Ol'shanskij V.I. (2004), *Ocenka i prognozirovanie mehanicheskix svojstv tekstil'nyh nitej* [Estimation and prediction of the mechanical properties of textile yarns], Vitebsk, UO Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet - Educational Institution Vitebsk State Technological University, 225 p.
5. Kuznetsov, A.A. (2007), *Prognozirovanie pokazatelej deformacionnyh svojstv tekstil'nyh nitej po rezul'tatam poluciklovogo ispytaniya na rastjazhenie* [Forecasting of deformation properties of textile yarns by results of half-

cycle of the tensile test], *Vestnik VGTU - Bulletin of Vitebsk State Technological University*, Vitebsk, 2007, № 12, pp. 36-41.

6. Kukin, G.N., Solov'ev A.N., Kobljakov A.I. (1989), *Tekstil'noe materialovedenie (volokna i niti)* [Textile materials science (fibers and yarns)], Moscow, 352 p.
7. Morton, W.E., Hearle, J.W.S. (2008), *Physical properties of textile fibres*, England, Cambridge, 765 p.

*Статья поступила в редакцию 13. 10. 2014 г.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ТЕПЛОПЛОМАССОБМЕНА

А.И. Ольшанский, С.В. Жерносек

УДК 66.047:536.248

### РЕФЕРАТ

*ИНТЕГРАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, КРИТЕРИЙ НУС-СЕЛЬТА, КРИТЕРИЙ БИО, КРИТЕРИЙ БОЛЬЦМАНА, КРИТЕРИЙ КОНДРАТЬЕВА, КРИТЕРИЙ КОССОВИЧА, ТЕМП НАГРЕВАНИЯ ВЛАЖНОГО ТЕЛА, ТЕМП УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ, СКОРОСТЬ СУШКИ*

*Объектом исследования является процесс истечения вязкой несжимаемой жидкости через плоское щелевое отверстие под действием сил гидростатического давления.*

*Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.*

*Установлено, что изменение скорости течения вязкой несжимаемой жидкости при ламинарном режиме подчиняется параболическому закону. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить величину гидростатического давления для обеспечения необходимой производительности и толщины покрытия при производстве различных искусственных материалов.*

### ABSTRACT

*INTEGRAL TEMPERATURE, MEASURE OF NUSSELT, MEASURE OF BIOT, MEASURE OF BOLZMANN, MEASURE OF KONDRATIEVA, MEASURE OF KOSSOVICH, THE RATE OF HEATING WET BODY, THE RATE OF REMOVAL OF MOISTURE, THE SPEED OF DRYING*

*The results of the research of fabrics drying by thermo-radiation methods of similarity theory of heat mass exchange and regular heating mode of wet bodies at a constant temperature of the heat carrier are presented in this article. It allows to obtain the empirical equations for calculation of the main characteristics of fabrics drying kinetics on the basis of the Boltzmann's radiation measure. The rate of heating of wet body and rate of loss moisture were determined. The proposed method of research can be used for the calculation of drying kinetics of various wet materials and saves time and money for carrying out the experiment and reduces the amount of computational work.*

### ВВЕДЕНИЕ

Сушка тканей термоизлучением является одним из эффективных способов термического обезвоживания материалов. За счет интенсификации процесса сушки и возникающих больших удельных тепловых потоков получают значительный технологический и экономический эффект [1]. Эффективность терморadiaционной сушки заключается еще и в том, что оно обеспечивает высокотемпературный нагрев ткани, уменьшается миграция красителей и аппретов, при этом наблюдается высокая интенсивность испарения влаги с поверхности материала за счет максимальной глубины проникновения лучей в ткань

и обеспечивается высокое качество обрабатываемого продукта [1]. Предварительно перед сушкой ткани проводят технологическую обработку специальными полимерными аппретами и клеевыми пропитками для обеспечения жесткости и каркасности. Нанесение аппретов на ткань с одновременным увлажнением производится в плюсовочных ваннах. Затем ткани подвергаются каландрированию для обеспечения равномерной влажности и поступают на сушку.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сушка технических тканей производилась на металлической поверхности стола экспери-

ментальной установки при вынужденном движении воздуха. Ткань располагалась параллельно от близко расположенных (250 мм) светлых источников излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома  $\epsilon_1 \approx 0,82 \div 0,90$ , стекла  $\epsilon_2 \approx 0,82 \div 0,92$ . При принятом расположении ткани от излучателей угловые коэффициенты излучения  $\varphi$ , характеризующие эффективность излучения  $\varphi = 1$ . Степень черноты натуральных тканей  $\epsilon_m \approx 0,75 \div 0,80$ .

Исследование комбинированной конвективно-терморрадиационной сушки тканей проводилось с трехкратной повторяемостью эксперимента для каждого режима с целью получения достоверных результатов. Сушка тканей проводилась при трех режимах: 1).  $t_{uзн} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2).  $t_{uзн} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3).  $t_{uзн} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Скорость воздуха  $v = 0,8 \div 1,1 \text{ м/с}$ .

Решение системы уравнений тепломассопереноса дает зависимость процесса сушки от большой группы тепломассообменных критериев подобия. Однако не все критерии в одинаковой мере влияют на характер протекания процесса сушки [2]. В условиях терморрадиационной сушки тканей для безразмерной избыточной температуры можно записать

$$T^* = f(X, Fo, Bi, Rb, Bo, \epsilon, Ko, Pd, Pn, \Psi, \Gamma),$$

где  $T^*$  – относительная избыточная температура материала;  $X$  – безразмерная координата;  $Fo$  – критерий Фурье;  $Bi$  – критерий Био;  $Rb$  – критерий Ребиндера;  $Bo$  – критерий Больцмана;  $\epsilon$  – критерий фазового превращения вещества;  $Ko$  – критерий Коссовича;  $Pd$  – критерий Предводителява;  $Pn$  – критерий Поснова;  $\Psi$  – коэффициент неравномерности распределения температуры и влажности в теле;  $\Gamma$  – постоянная формы.

При изменении условий взаимодействия поверхности материала с внешней средой происходит изменение влияния критериев подобия на процесс сушки. В зависимости от роли и влияния на процесс сушки критерии подобия подразделяются на критерии поверхностного тепловлагообмена и критерии внутреннего тепломассопереноса [2]. Поскольку коэффициенты теплопереноса для тканей хорошо изучены [3], исследование сушки тканей тепловыми лучами ограничиваем изучением влияния критериев подобия на теплоперенос, а закономерности влагообмена рассмотрим на основе обработки экспериментальных данных. Зависимость коэффициентов теплопереноса для тканей приведены в таблице 1.

В процессе сушки тонких материалов

Таблица 1 – Зависимость коэффициентов переноса тепла от влажности тканей

Вискоза $\lambda_0 = 0,058 \text{ Вт / м } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ; $c_0 = 1600 \text{ Дж / кг } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ;					Лен $\lambda_0 = 0,058 \text{ Вт / м } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ; $c_0 = 1600 \text{ Дж / кг } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ;				
W, %	$\lambda_0$ , Вт / м · °C	$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	$c$ , Дж / кг · °C	$a$ , м <sup>2</sup> / ч	W, %	$\lambda_0$ , Вт / м · °C	$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	$c$ , Дж / кг · °C	$a$ , м <sup>2</sup> / ч
90	0,187	759	2825	3,14	160	0,276	675	3150	4,67
80	0,173	713	2750	3,17	140	0,248	637	3060	4,58
60	0,144	640	2569	3,15	120	0,219	587	2960	4,537
50	0,13	600	2462	3,16	100	0,19	537	2840	4,49
40	0,116	556	2339	3,24	80	0,161	482	2690	4,48
20	0,087	488	2031	3,16	60	0,132	430	2500	4,47
10	0,072	453	1835	3,11	40	0,104	374	2260	4,41
					20	0,075	321	1946	4,32
					10	0,06	294	1744	4,27

при значениях теплообменного критерия Био  $Bi < 0,2$  и критерия Фурье  $Fo > 0,2$  происходит быстрое прогревание материала за счет глубокого проникновения излучения в ткань и выравнивания температур и влагосодержаний по поверхности и объему [1, 4]. В этих условиях сушка тканей происходит без температурных градиентов внутри тела и отсутствия в материале термического переноса вещества [2].

В отсутствии термического переноса вещества и фазовых превращений в тонких материалах влияние комплексного критерия  $\epsilon \cdot Ko \cdot Pn = 0$  [2]. Критерий Ребиндера  $Rb$  и критерий Био  $Bi$  оказывают влияние на теплоперенос. При малых значениях этих критериев влияние на скорость изменения температуры  $dT / dFo$  незначительно. В процессе сушки с уменьшением влагосодержания критерий  $Rb$  увеличивается, а критерий  $Ko$  уменьшается. Значения критерия  $Rb$  к концу сушки  $Rb \approx 0,1 \div 0,35$  указывают на необходимость прекращения процесса для избежания перерасхода энергии на сушку и пересушивания материала. Критерий Коссовича  $Ko$  на начальной стадии сушки большее влияние оказывает на массоперенос, в заключительной – на теплоперенос [2]. Скорость прогрева материала определяется комбинированным отношением критериев  $Bi / Ko = f(Fo)$  [2]. Критерий фазового превращения  $\epsilon$  и критерий Поснова  $Pn$  в отсутствии термического переноса вещества  $\epsilon \cdot Pn = 0$  (влага в материале перемещается в виде жидкости). Постоянная формы тела для плоских тел  $\Gamma = 0$ . Коэффициенты неравномерности распределения температуры  $\Psi_t$  и влагосодержания  $\Psi_u$  во влажном теле при значениях критерия  $Bi < 0,2$  для тканей равны  $\Psi_t = \Psi_u = 1$ . Происходит быстрое выравнивание температур и влагосодержаний в теле по поверхности и объему. Произведение критериев  $Fo$  и Предводителя  $Pd$  представляют важные обобщенные переменные по температурам и влагосодержаниям

$$Fo \cdot Pd_t = \frac{a\tau m_t R_v^2}{R_v^2 a} = m_t \tau; Fo \cdot Pd_u = m_u \tau, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время сушки, мин;  $R_v$  – отношение объема тела к поверхности, м;  $m_t$  и  $m_u$  – темп

нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания, мин<sup>-1</sup>.

Радиационный критерий Больцмана  $Bo$  получен из решения уравнения энергии для сложного теплообмена в плоском слое поглощающей и излучающей среды с непрозрачными серыми границами [5]. В результате решения получен безразмерный комплекс

$$Bo = \frac{\lambda_m}{\epsilon_z \sigma_0 T_*^3 \delta_*}, \quad (2)$$

где  $\lambda_m$  – теплопроводность излучающей непрозрачной среды;  $\epsilon_z$  – степень черноты излучающего газа;  $\sigma_0$  – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>;  $T_*$  – абсолютная температура излучающей среды по толщине излучающего слоя  $\delta_*$ .

А.Н. Пехович [6] использовал критерий  $Bo$  для расчета температуры твердых тел при нагреве и охлаждении по номограммам. Для случая радиационного теплообмена в прозрачной непоглощающей среде критерий Больцмана имеет вид:

$$Bo = \frac{\lambda_m}{\epsilon_{np} \sigma_0 T_{изл}^3 \delta}, \quad (3)$$

где  $\lambda_m$  – теплопроводность тела;  $\epsilon_{np}$  – приведенная степень черноты системы излучатель-материал;  $T_{изл}$  – абсолютная температура излучателя, К;  $\delta$  – толщина материала, мм.

При построении расчетных графиков необходимы дополнительные условия: начальная температура материала  $T_{ом}$ ; температура излучателя  $T_{изл}$ ; отношение  $T_{ом} / T_{изл}$ , приведенная степень черноты системы излучатель-материал  $\epsilon_{np}$  и безразмерная координата  $x / \delta$ .

Безразмерная избыточная температура  $T^*$  задается условием

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{ам}}, \quad (4)$$

где  $t_c$ ,  $\bar{t}$ ,  $t_{ам}$  – температура среды (воздуха), среднеинтегральная, и начальная температура влажного материала, °С.

За определяющую температуру при сушке тканей принималась температура теплоносителя (среды)  $t_c$ . Степень черноты системы излуча-



тель-материал определялась по зависимости

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_m$  – степени черноты нихромового излучателя и материала.

Критерий  $Bo_0$  абсолютно сухих тканей при заданных значениях  $\varepsilon_{np}$  зависит только от режима сушки  $T_{усл}$ , поскольку коэффициент теплопроводности сухих тканей  $\lambda_0$  от температуры не зависит [3]. Численные значения  $Bo_w$  для влажных тканей значительно зависят от влажности. Влияние влажности тканей на теплопроводность и теплоемкость значительно и выражается зависимостями [3]

$$\lambda_w = \lambda_0 + 0,00145W, \text{ Вт/м}^\circ\text{С};$$

$$c_w = \frac{c_0 + c_s \bar{u}}{1 + \bar{u}}, \text{ Дж/кг}^\circ\text{С},$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_w$  – теплопроводности сухого и влажного материала, Вт/м<sup>°С</sup>;  $c_0$  и  $c_s$  – теплоемкости сухого тела и воды, Дж/кг<sup>°С</sup>;  $W$  и  $\bar{u}$  – абсолютное и относительное текущее влагосодержание материала.

Плотность влажной ткани  $\rho_w$  измерялась в эксперименте весовым способом. Коэффициент температуропроводности  $a$  влажной ткани вычислялся по соотношению

$$a = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Значения коэффициентов теплопереноса для тканей даны в таблице 1.

Безразмерная координата  $X = x / \delta$  при  $x = \delta$  для тонких материалов  $X = 1$ . В качестве определяющего размера принимается отношение объема тела к поверхности  $R_v = V / F = \delta$ . Упрощенное критериальное уравнение для безразмерной температуры можно представить в виде

$$T^* = f( Fo, Pd_t, Rb, Bi / Ko, Bo ),$$

где  $Fo \cdot Pd_t = m_t \tau$ .

#### РЕГУЛЯРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ

В процессах нагревания или охлаждения твердых тел широко используется теория регу-

лярного режима Г.М. Кондратьева, согласно которой процесс нагревания определяется только условиями внешнего теплообмена, теплофизическими свойствами и размерами тела, а температура материала изменяется во времени по экспоненциальному закону [4]. Нагрев влажного тела в процессе сушки при  $t_c = const$  представляет регулярный режим, как по температурам, так и по влагосодержаниям [4], поскольку и кривые сушки и температурные кривые представляют собой экспоненты.

Основным признаком регулярного режима в процессе сушки являются условия

$$-\frac{dt}{d\tau} = m_t (t_c - \bar{t}); \quad (6)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = m_u (u_0 - \bar{u}), \quad (7)$$

где  $u_0$  – начальное влагосодержание материала.

Постоянные  $m_t$  и  $m_u$  определяются экспериментально, построением графических зависимостей  $\ln(t_c - \bar{t})$  и  $\ln(W_0 - \bar{W})$  от времени сушки  $\tau$ .

Темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания  $m_u$  находятся из соотношений

$$tg \gamma_1 = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\tau_2 - \tau_1} = m_t; \quad (8)$$

$$tg \gamma_2 = \frac{\ln(W_0 - W_2) - \ln(W_0 - W_1)}{\tau_2 - \tau_1} = m_u, \quad (9)$$

где  $t_c$  – температура среды (воздуха), <sup>°С</sup>;  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$  – фиксированные значения температуры, <sup>°С</sup>;  $W_0$  – начальное влагосодержание материала;  $W_1$  и  $W_2$  – фиксированные значения влагосодержания.

Из уравнения теплового баланса для стадии регулярного режима [4] можно записать выражение для темпа нагревания влажного тела

$$m_t = \frac{\bar{a} a}{\lambda_T R_v} \Psi_t = \frac{a}{R_v^2} Kn, \quad (10)$$

$$Kn = Bi \cdot \Psi_t = \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{\tau}} R_V \Psi_t; \Psi_t = \frac{t_c - t_n}{t_c - \bar{t}}$$

где  $\bar{\alpha}$  – текущее значение коэффициента теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\Psi_t$  – коэффициент неравномерности распределения температуры в теле;  $Kn$  – критерий Кондратьева;  $t_n$  – температура поверхности, °С.

При сушке тканей  $R_V = 0,8 - 1,2$  мм и при значениях критерия  $Bi < 0,2$  коэффициент формы  $K_{\phi} \rightarrow 0$ , а коэффициент неравномерности распределения температуры в теле  $\Psi_t = 1$ .

В этом случае  $Kn = Bi$ , а темп нагревания влажного тела равен [4, 7]

$$m_t = \frac{a}{R_V^2} Bi = \frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V}. \quad (11)$$

Для случая нагревания влажного тела при  $Bi \rightarrow 0$  и отсутствия градиента температуры внутри тела можно записать балансовое уравнение тепла [4, 7]:

$$c_w \rho_o \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}) \frac{F}{V}, \quad (12)$$

где  $F$  – площадь поверхности влажного тела, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем влажного тела, м<sup>3</sup>.

Тепло  $\bar{\alpha} (t_c - \bar{t})$  идет на нагревание влажного тела. Решение (12) можно записать следующим образом [7]:

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{an}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V} \tau\right). \quad (13)$$

Из уравнений (11) и (13) следует

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{an}} = \exp(-m_t \tau). \quad (14)$$

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено значение темпа нагревания для влажных тканей  $m_t = 0,24$ . Вычисление  $m_t$  по зависимости (11) дает значение  $m_t \approx 0,3 - 0,4$ .

Для безразмерного влагосодержания можно написать аналогичное соотношение:

$$\bar{U}^* = \frac{W_o - W}{W_o - W_p} = \exp(-m_u \tau), \quad (15)$$

где  $W_o, W_p, W$  – начальное, равновесное и текущее влагосодержание материала.

Секундный поток тепла на нагрев влажного тела [7]

$$q = c_w \rho_o R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau}. \quad (16)$$

Дифференцируя решение (13) и подставляя результат в (16), получаем [7]:

$$\frac{q}{\bar{\alpha} (t_c - t_{an})} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V} \tau\right), \quad (17)$$

где  $t_c, t_{an}$  – температура среды (воздуха) и начальная температура влажного материала, °С.

Максимальное количество тепла, затраченное на испарение влаги из материала в начальной стадии процесса сушки, равно:

$$q_{max} = \bar{\alpha}_{кр} (t_c - t_{om}) = r \rho_o R_V (d\bar{u}/d\tau)_{max}. \quad (18)$$

где  $(d\bar{u}/d\tau)_{max} = N_{max}$  – максимальная скорость сушки, определяемая по кривым сушки;  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг.

Тогда уравнение (17) с учетом (18) можно записать в виде

$$q = q_{max} \exp(-m_t \tau). \quad (19)$$

Следовательно, регуляризация кинетики сушки происходит не только по температурам и влагосодержаниям, но и по тепловым потокам.

#### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ВЫВОД ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

На рисунке 1 представлены кривые сушки и температурные кривые в процессе сушки вискозной ткани при различных режимах. Видно, что периода постоянной скорости сушки не наблюдается ни по температурам, ни по влагосодержаниям.

На рисунке 2 изображены графические зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$  и  $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$  для процесса сушки вискозы. Видно, что зависимости имеют вид прямых и, следовательно, изменение температуры и влагосодержания происходит по экспоненциальной зависимости. Темп нагревания влажного тела  $m_t$  является одинаковым для всех точек тела и не зависит от режима сушки. В стадии регулярного режима при  $Bi < 0,2$  и  $\Psi_t = 1$  температура принимает равномерное распределение по всему объёму тела и поверхности. Величина  $m_t$  не зависит от размеров, физических свойств тела, режима сушки и в стадии регулярного режима является величиной постоянной для среднеинтегральных значений температур и определяется только формой и видом тела [4, 7].

Темп убыли влагосодержания  $m_u$  является сложной функцией режима сушки, начального влагосодержания материала  $W_0$ , способа подвода тепла и других факторов, влияющих на сушку. Обработка опытных данных показала, что отношение максимальной скорости сушки тканей к начальному влагосодержанию  $W_0$  является обобщенной переменной, учитывающей влияние всех факторов, воздействующих на процесс.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты обработки экспериментальных данных в виде зависимостей  $U^* = f(m_u \tau)$ ;  $m_u = f(N_{max})$ ,  $T^* = f(m_t \tau)$  и  $T^* = f(Bi_{0,2})$ .

В результате обработки данных методом наименьших квадратов получены уравнения

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{ан}} = \exp(-1,15 m_t \tau); \quad (20)$$

$$U^* = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_p} = 0,17 \exp(m_u \tau); \quad (21)$$

$$m_u = \frac{N_{max}}{W_0} = 8,7 \cdot 10^{-3} N_{max},$$

где  $N_{max} = (d\bar{u} / d\tau)$  – максимальная скорость сушки материала, мин<sup>-1</sup>.

Использование устойчивых обобщенных комплексных переменных  $m_t \tau$  и  $m_u \tau$  позволяет определять температуру материала и время сушки при любых режимах и различных начальных влагосодержаниях. Такой метод исследования

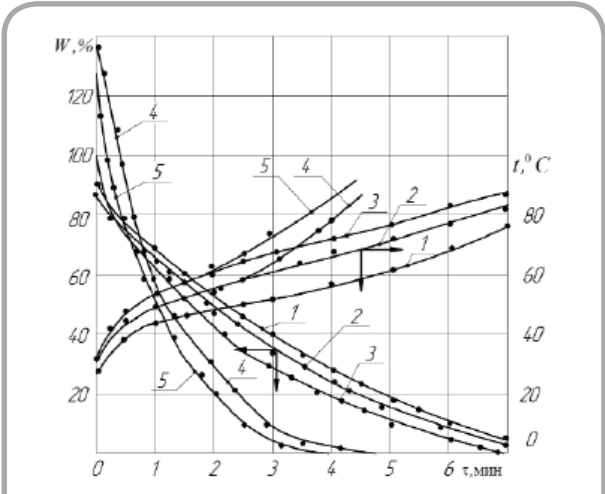


Рисунок 1 – Кривые сушки и температурные кривые в процессе сушки вискозной ткани при режимах: Вискоза. 1.  $t_{узн} = 150$  °C;  $t_c = 80$  °C; 2.  $t_{узн} = 190$  °C;  $t_c = 100$  °C; 3.  $t_{узн} = 250$  °C;  $t_c = 120$  °C; Лен: 4.  $t_{узн} = 190$  °C;  $t_c = 100$  °C; 5.  $t_{узн} = 250$  °C;  $t_c = 120$  °C; Скорость воздуха:  $v = 0,8 \div 1,1$  м/с.

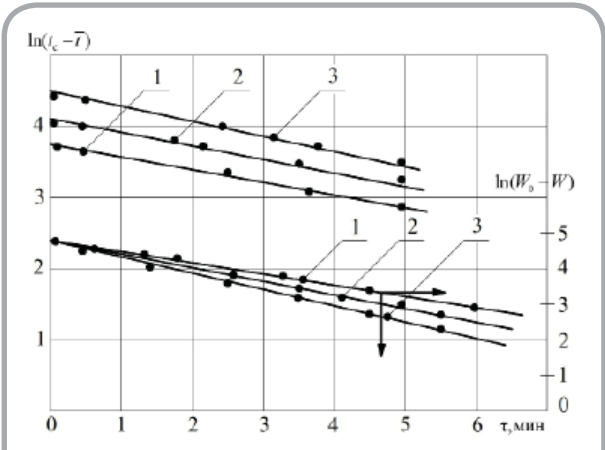


Рисунок 2 – Зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$  и  $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$  в процессе сушки вискозной ткани

значительно экономит время и сокращает объем расчетной работы. Решение уравнений (20) и (21) дает

$$\bar{t} = t_c - \frac{t_c - t_{ан}}{\exp(1,15 m_t \tau)} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{1}{m_u} \ln \frac{W_0 - W}{0,17 (W_0 - W_p)} \quad (23)$$

Для исследования влияния на кинетику сушки тканей критериев подобия необходимо знать закономерности их изменения. Вычисление коэффициента теплообмена проводилось по критериальному уравнению [1]

$$Nu = 0,87 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \left(\frac{T_{изл}}{T_c}\right)^{0,45} \left(\frac{W_0}{W}\right)^{0,45}, \quad (24)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $T_m$ ,  $T_{изл}$  и  $T_c$  – абсолютные температуры мокрого термометра, излучателя, среды (воздуха).

За определяющий размер при сушке тканей принималась длина образца по набеганию потока воздуха  $l = 0,12$  м.

Плотность теплового потока определялась по уравнению теплообмена

$$q = \bar{\alpha}(t_c - t_n).$$

Критерий Ребиндера  $Rb$  и критерий Коссовича  $Ko$  вычислялись по соотношениям

$$Rb = \frac{c_w b}{r}; \quad Ko = \frac{r \Delta \bar{u}}{c_w \Delta t} = \frac{r(\bar{u}_0 - u_p)}{c_w(t_c - t_{ан})}.$$

Температурный коэффициент сушки  $b = d\bar{t} / d\bar{u}$  – важная характеристика кинетики сушки, определяется графическим дифференцированием температурных кривых  $\bar{t} = f(\bar{u})$  (рисунок 5 а). Обработкой эксперимента, представленного на рисунок 5 б, получена зависимость

$$Rb = 0,1 \exp(-1,4(\bar{u} - u_p)). \quad (25)$$

В процессе сушки влажных материалов критерий  $Rb$  изменяется от нуля до некоторой максимальной величины, указывающей на прекращение процесса, а критерий  $Ko$  – от максимальной величины в начальной стадии сушки до нуля при  $W = W_p$ .

Результаты исследования влияния критериев подобия теплообмена на закономерности изменения относительной температуры  $T^*$  для всех режимов даны в таблице 2, а на рисунке 6

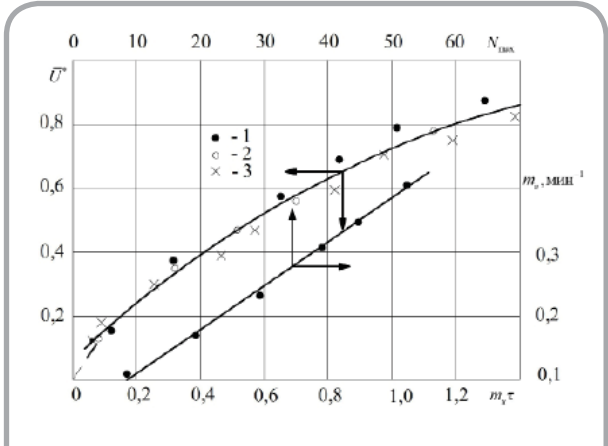


Рисунок 3 – Зависимость относительного влагосодержания  $\bar{U}^*$  от относительного времени сушки  $m_u \tau$  и зависимость темпа убыли влагосодержания  $m_u = f(N_{max})$  для процесса сушки вязкой ткани при режимах, указанных на рисунке 1

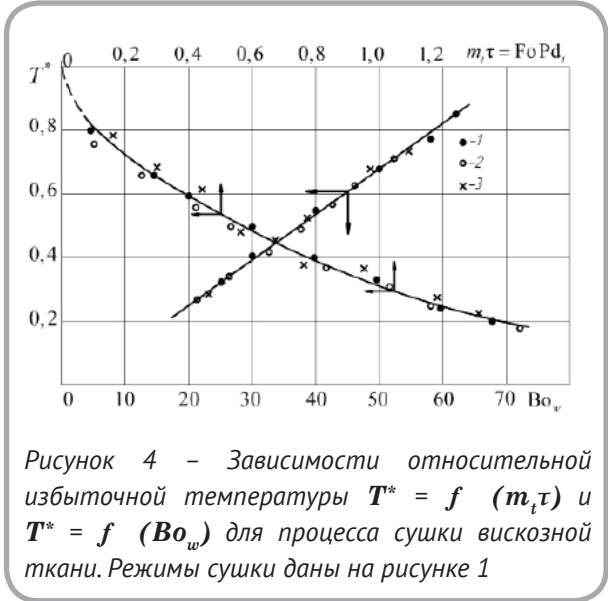


Рисунок 4 – Зависимости относительной избыточной температуры  $T^* = f(m_u \tau)$  и  $T^* = f(Bo_w)$  для процесса сушки вязкой ткани. Режимы сушки даны на рисунке 1

представлены зависимости для процесса сушки вязкой ткани

$$Bi / Ko = f(Fo \cdot Pd_i) = f(m_i \tau) \text{ и}$$

$$T^* = f(Fo \cdot Pd_i) = f(m_i \tau).$$

Зависимость относительной избыточной температуры  $T^* = f(Bi / Ko)$  имеет вид

$$T^* = 0,06 (Bi / Ko)^{0,5}. \quad (26)$$

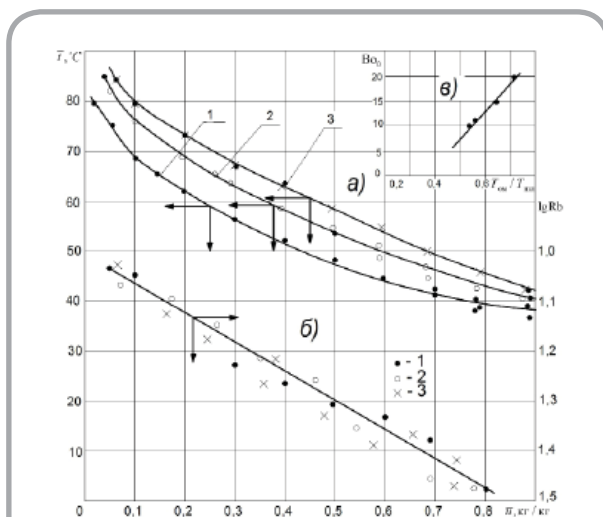


Рисунок 5 – Зависимости среднеинтегральной температуры  $\bar{t}$  и критерия Рейбиндера  $Rb$  от влагосодержания  $\bar{u}$  (а, б) и критерия Больцмана для сухого тела  $Bo_0 = f(T_{om}/T_{uzl})$  (в) в процессе сушки тканей. Режимы указаны на рисунке 1

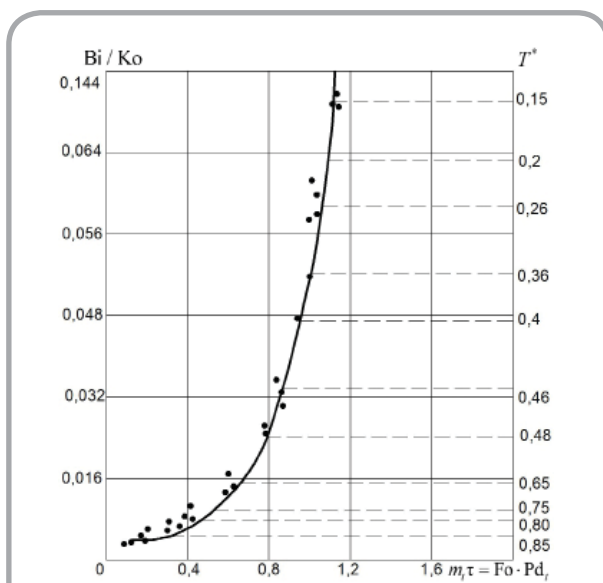


Рисунок 6 – Зависимости отношения критериев  $Bi/Ko$  и относительной температуры  $T^*$  от комбинированного критерия  $Fo \cdot Pd_t = m_t \tau$  в процессе сушки технических тканей для заданных режимов сушки

Рассмотрим влияние критерия Больцмана на теплоперенос в процессе терморadiационной сушки тканей. При терморadiационной сушке влажных материалов значительно интенсифицируется теплообмен и увеличивается

интенсивность испарения влаги с поверхности влажного тела. В этих условиях критерий Больцмана в одинаковой мере влияет на тепло- и влагообмен.

Численные величины критерия  $Bo_0$  для сухих тканей при заданных режимах сушки в зависимости от режима при  $\lambda_0 = const$  принимали следующие значения для вязкой и ткани:

1.  $T_{uzl} = 423 \text{ K}$ ;  $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{om}/T_{uzl} = 0,71$ ;  $Bo_0 = 18$ .
2.  $T_{uzl} = 463 \text{ K}$ ;  $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{om}/T_{uzl} = 0,65$ ;  $Bo_0 = 15$ .
3.  $T_{uzl} = 523 \text{ K}$ ;  $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{om}/T_{uzl} = 0,57$ ;  $Bo_0 = 11$ .

На рисунке 4 представлена зависимость  $T^* = f(Bo_w)$  для процесса сушки вязкой ткани, описываемая уравнением

$$T^* = 0,0135 (Bo_w + 0,55 W), \quad (27)$$

$$Bo_w = Bo_0 + 0,55 W. \quad (28)$$

Критерий Больцмана  $Bo$  для сухого материала является функцией  $T_{uzl}$  и отношения  $T_{om}/T_{uzl}$  и определяется зависимостью

$$Bo_0 = 49,5 \frac{T_{om}}{T_{uzl}} - 17. \quad (29)$$

Взаимосвязь между критериями Больцмана для влажной и сухой тканей при сушке тепловыми лучами для заданных режимов можно выразить уравнениями

$$\frac{Bo_w}{Bo_0} = \frac{T_{uzl}}{T_{om}} \exp(0,012 W); \quad (30)$$

$$Bo_w = \frac{T_{uzl}}{T_{om}} Bo_0 \exp(0,012 W). \quad (31)$$

где  $W$  – заданное текущее влагосодержание материала.

Плотность тепловых потоков в процессе сушки тканей достаточно точно вычисляется по уравнениям (18) и (19). На рисунке 7 б даны за-

Таблица 2 – Расчетные значения критериев Нуссельта  $Nu$ , Био  $Bi$ , Коссовича  $Ko$  для процесса сушки вискозной ткани при различных режимах

Режим сушки: $T_{изл} = 423 \text{ K}$ ; $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
$W, \%$	$Nu$	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$	$Bi$	$Ko$	$Bi / Ko$	$T^*$	$\bar{t}_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{рас}, \text{ }^\circ\text{C}$
80	87,7	26,3	0,13	31,7	0,004	0,84	40	38
60	78	23,4	0,138	20	0,007	0,76	44	42
40	63,1	18,9	0,135	12,7	0,011	0,65	50	48
20	46,2	13,9	0,132	5,4	0,024	0,46	61	58
10	32,2	10,2	0,125	2,5	0,049	0,35	67	64
Режим сушки: $T_{изл} = 463 \text{ K}$ ; $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
80	94,9	30,5	0,145	29	0,005	0,84	45	42
60	83,6	26,8	0,151	17	0,0088	0,75	50	48
40	68,3	21,8	0,155	9,85	0,0157	0,65	56	55
20	50,1	16,2	0,157	4,7	0,033	0,48	68	69
10	26,5	11,7	0,145	2,2	0,066	0,38	73	73
Режим сушки: $T_{изл} = 523 \text{ K}$ ; $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
80	104	34,4	0,168	29	0,0058	0,86	46	43
60	91,8	30,3	0,17	16	0,01	0,76	53	52
40	75	24,7	0,175	9,4	0,018	0,69	63	64
20	54,9	18,1	0,178	4,3	0,0410,	0,50	74	75
10	40,3	13,5	0,165	2,2	075	0,45	80	79

висимости  $q = f(W)$ , которые выражаются уравнением

$$q = D \exp(0,015W); D = 10^3 \left( 3,4 - 3,8 \frac{T_{изл}}{T_{изл}} \right). \quad (32)$$

Для подтверждения достоверности полученных значений тепловых потоков по уравнениям (19) и (32) проведен расчет теплообмена по формуле излучения Стефана-Больцмана с учетом влияния конвекции [3]:

$$q_{изл} = (\varepsilon_{пр} + \varepsilon_{к}) C_0 \left[ \left( \frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \varphi \left( \frac{W_0}{W} \right)^{0,42}, \quad (33)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\text{Вт/м}^2 \text{ K}^4$ .

Угловой коэффициент эффективности излучения  $\varphi = 1$ .

Приведенная степень черноты системы определялась по выражению (5).

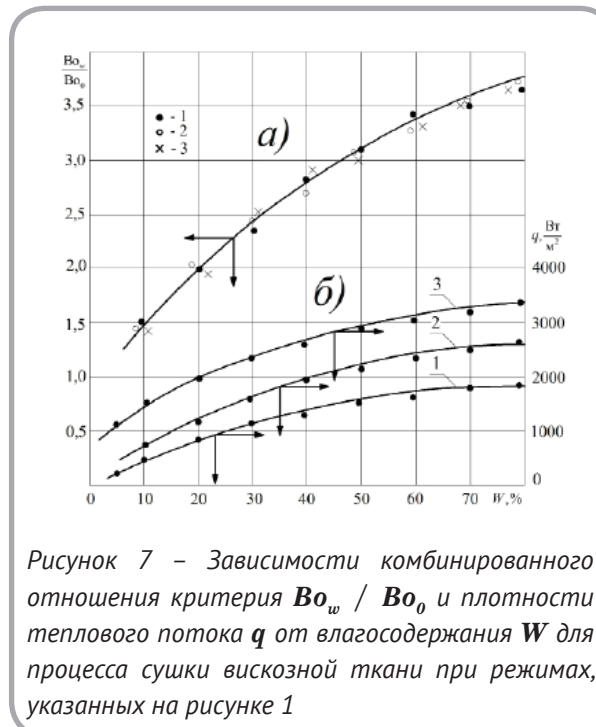


Рисунок 7 – Зависимости комбинированного отношения критерия  $Bo_w / Bo_0$  и плотности теплового потока  $q$  от влагосодержания  $W$  для процесса сушки вискозной ткани при режимах, указанных на рисунке 1

Участие конвекции учитывается увеличением степени черноты системы за счет  $\varepsilon_{к}$ :

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{\bar{a}_{\kappa}(t_c - \bar{t}_n)}{C_o \left[ \left( \frac{T_{усл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right]}$$

При использовании уравнения (33) суммарное значение  $(\varepsilon_{np} + \varepsilon_{\kappa})$  составляло 0,66 – 0,7 для всего процесса сушки тканей. Результаты расчетов  $q_{усл}$  по формуле (33) даны в таблице 3.

ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ТКАНЕЙ

По результатам экспериментов (рисунке 1) вычисляются значения относительной избыточной температуры  $T^*$  как функция влагосодержания  $W$  тканей. Затем, с использованием таблицы 1, вычисляются значения критериев Больцмана для абсолютно сухой и влажной тканей. По эмпирическим формулам (27, 28) наносятся линии  $Bo_o = const$  с фиксацией значений влагосодержаний для каждого режима сушки и строятся линии  $W = const$  с обозначением времени сушки  $\tau = f(W)$ . В нижней части графика (рисунок 8) наносятся зависимости плотности тепловых потоков  $q = f(Bo_w, W)$ . Таким образом, все основные характеристики сушки тканей тепловыми лучами рассчитываются графическим способом, что позволяет достаточно просто, точно и быстро проводить все необходимые расчеты, что

экономит время и сокращает объем расчетной работы. График (рисунок 8) является расчетной номограммой.

Для расчетов по графику достаточно знать режим сушки, который задается значением  $Bo_o$  и текущим влагосодержанием  $W$ . В таблице 4 дано сопоставление экспериментальных и графических значений основных параметров кинетики сушки вискозной ткани по графику рисунка 8.

Пример расчета: Режим сушки вискозы  $T_{усл} = 423$  К,  $T_{ом} / T_{усл} = 0,71$ . Для данного режима  $Bo_o = 18$ . По заданному текущему влагосодержанию  $W = 60$  %, относительная температура  $T^* = 0,66$ ; интегральная температура  $\bar{t}_{граф} = 44$  °С;  $\bar{t}_{экс} = 43$  °С; время сушки:  $\tau_{граф} = 1,5$  мин;  $\tau_{экс} = 1,5$  мин;  $Bo_w_{граф} = 49,5$ ;  $Bo_w_{расч} = 51$ ;  $Bo_w_{расч} = 50,5$  по формулам (28) и (31).

Для вискозной ткани расчетный график строится в том же порядке, с использованием тех же эмпирических уравнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования терморационной сушки тканей рассмотрено влияние отдельных критериев подобия теплообмена на кинетику сушки технических тканей. Изучение кинетики

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений среднеинтегральных температур, времени сушки и плотностей тепловых потоков по формулам (22), (23) и (19), (32), (33) для различных режимов сушки вискозной ткани

Режим сушки: $T_{усл} = 423$ К; $t_c = 80$ °С; $v = 1,1$ м/с								
W, %	$\tau_{экс}$ , МИН	$\tau_{рас}$ , МИН (23)	$\bar{t}_{экс}$ , °С	$\bar{t}_{рас}$ , °С (22)	q, Вт/м <sup>2</sup> (19)	q, Вт/м <sup>2</sup> (32)	$q_{экс}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$q_{усл}$ , Вт/м <sup>2</sup> (33)
80	0,65	0,72	42	40	2750	3060	2650	2880
60	1,95	1,76	54	54	2314	2280	2270	1890
40	2,85	3,2	61,5	62	1965	1795	2000	1750
20	4,5	4,3	71,5	72	1380	1270	1280	1100
10	5,4	4,9	78	78	1980	1020	850	780
Режим сушки: $T_{усл} = 523$ К; $t_c = 120$ °С; $v = 1,1$ м/с								
80	0,4	0,47	42	39	3510	3900	3420	3300
60	1,25	1,45	55	54,5	3140	3150	3125	2780
40	2,32	2,54	68	68	2585	2350	2620	2100
20	3,7	3,35	77	79	2140	1780	2000	1690
10	5,7	5,2	83	85	1427	1495	1500	1250

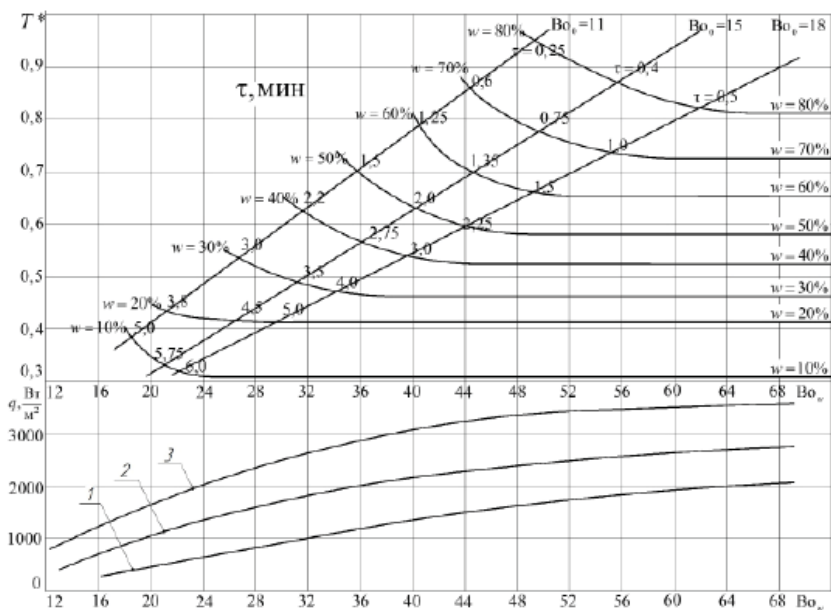


Рисунок 8 – График для расчета основных параметров кинетики сушки вязкой ткани для заданных режимов

сушки тканей методом регулярного теплового режима нагревания влажных тел и обработка опытных данных на основе обобщенных переменных позволяет получить расчетные эмпирические уравнения для определения основных кинетических характеристик процесса. Определены темп нагревания влажного тела  $m_t$  и темп убыли влагосодержания  $m_w$ . На основе взаимо-

связи между критерием Больцмана для сухого и влажного тела предложен графический способ расчета кинетики сушки тканей, что экономит время и средства на проведение эксперимента и сокращает объем расчетной работы. Предлагаемый метод исследования может быть использован в расчетах кинетики сушки различных влажных материалов термоизлучением.

Таблица 4 – Сопоставление экспериментальных и графических значений основных параметров кинетики сушки вязкой ткани по графику рисунка 8

Режим сушки: $T_{изл} = 423 \text{ K}; t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1,1 \text{ м/с}$								
$W, \%$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{рас}, \text{ }^\circ\text{C}$ (23)	$T^*_{экс}$	$T^*_{граф}$	$\bar{t}_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{граф}, \text{ }^\circ\text{C}$	$q_{экс}, \text{ Вт/м}^2$	$q_{граф}, \text{ Вт/м}^2$ (32)
70	62	64	0,76	0,75	43	40	1850	1850
60	90	89	0,67	0,66	46	44	1700	1600
40	180	180	0,54	0,53	51	49,5	1250	1270
20	285	300	0,39	0,42	60,5	59	850	750
10	365	360	0,38	0,33	67	64	500	600
Режим сушки: $T_{изл} = 463 \text{ K}; t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1,1 \text{ м/с}$								
70	46	150	0,77	0,77	46	44	2500	2600
60	85	90	0,71	0,71	51	49	2450	2400
40	158	168	0,57	0,58	60	58	2000	2150
20	278	270	0,42	0,42	70	71	980	1150
10	295	305	0,33	0,33	78	76	750	950



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. (1968), *Теория сушки*, Москва, 472 с.
2. Лыков, А.В., Михайлов, Ю.А. (1963), *Теория тепло- и массопереноса*, Москва, 536 с.
3. Колесников, П.А. (1965), *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, 340 с.
4. Лыков, А.В. (1967), *Теория теплопроводности*, Москва, 600 с.
5. Кутателадзе, С.С. (1979), *Основы теории теплообмена*, Москва, 416 с.
6. Пехович А.Н., Жидких В.М. (1968), *Расчеты теплового режима твердых тел*, Ленинград, 304 с.
7. Лыков, А.В. (1961), *Теоретические основы строительной теплофизики*, Минск, 520 с.
8. Ольшанский, А.И., Ольшанский, В.И. (2011), Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима, *Весті НАН Беларусі*. Серия физико-технических наук, № 2, С. 75 – 81.
9. Ольшанский, А.И., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И. (2014), Графоаналитический метод расчета конвективно-терморadiационной сушки технических тканей, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, Вып. 26, С. 74–84.

## REFERENCES

1. Lykov, A.V. (1968), *Teorija sushki* [Drying theory], Moscow, 472 p.
2. Lykov, A.V., Mikhajlov, Y.A. (1963), *Teorija teplo- i massoperenosa* [Theory of heat - and mass transfer], Moscow, 536 p.
3. Kolesnikov, P. A. (1965), *Teplozashhitnye svojstva odezhdy* [Heat-shielding properties of clothes], Moscow, 340 p.
4. Lykov, A.V. (1967), *Teorija teploprovodnosti* [Heat conductivity theory], Moscow, 600 p.
5. Kutateladze, S.S. (1979), *Osnovy teorii teploobmena*, [Fundamentals of the theory of heat transfer], Moscow, 416 p.
6. Pekhovich, A.N., Zhidkikh, V.M. (1968), *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids], Moscow, 304 p.
7. Lykov, A.V. (1961), *Teoreticheskie osnovy stroitel'noj teplofiziki* [Theoretical fundamentals of construction thermophysics], Minsk, 520 p.
8. Ol'shanskij, A.I. (2011), Probe of process of drying of thin materials by a method of a regular mode [Issledovanie processa sushki tonkih materialov metodom reguljarnogo rezhima], *Vesti Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk – Vestie of National academy of Sciences of Belarus. Series of physics and technology sciences*, pp. 75-81.
9. Olshansky, A.I., Zhernosek, S.V., Olshansky, V. I. (2014), The graphic analytical method of calculation of convective-thermoradiation drying of technical fabrics [Grafoanaliticheskiy metod rascheta konvektivno-termoradiacionnoj sushki tehnicheskikh tkanej], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of Vitebsk State Technological University*, Issue 26, Vitebsk, 2014, pp. 74–84.

Статья поступила в редакцию 01. 09. 2014 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ПОЛИМЕРА ПРИ РАКЕЛЬНОМ СПОСОБЕ НАНЕСЕНИЯ

В.И. Ольшанский, Р.В. Окунев

УДК 677.4

### РЕФЕРАТ

*ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ЩЕЛЬ, СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ, ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ОБЪЕМНЫЙ РАСХОД*

*Объектом исследования является процесс истечения вязкой несжимаемой жидкости через плоское щелевое отверстие под действием сил гидростатического давления.*

*Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.*

*Установлено, что изменение скорости течения вязкой несжимаемой жидкости при ламинарном режиме подчиняется параболическому закону. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить величину гидростатического давления для обеспечения необходимой производительности и толщины покрытия при производстве различных искусственных материалов.*

### ABSTRACT

*LAMINAR FLOW, SLOT, FLOW VELOCITY ( ИЛИ FLOW SPEED), HYDROSTATIC PRESSURE, VOLUME FLOW*

*The authors have examined the regularity of changing liquid polymers flow velocity through a flat hole when multilayered composite materials are produced. The analytic dependence of hydrostatic pressure and its geometrical parameters allowing to define the liquid polymers flow velocity and flow line capability for the production of different multilayered composite materials are obtained.*

### ВВЕДЕНИЕ

При производстве различных многослойных материалов (обоев, искусственных кож) широко применяется ракель, который представляет собой устройство с плоской щелью, через которое происходит истечение жидкости под действием гидростатического давления на непрерывно движущуюся поверхность или основу.

Технологические режимы, обеспечивающие качественное нанесение, устанавливаются или эмпирически, или на основе методов математического планирования многофакторного эксперимента.

До настоящего времени отсутствует аналитическая зависимость, позволяющая на стадии проектирования определять технологические и

геометрические параметры ракеля при производстве различных материалов.

Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим установившееся ламинарное движение вязкого несжимаемого полимера в плоском зазоре ракеля толщиной  $\delta$ , шириной  $b$  (рисунок 1) и длиной  $l$ .

Введем систему координат  $ZOX$  и обозначим:

$P_0$  – давление на поверхности резервуара с полимером;  $\rho_{ж}$  – плотность полимера;  $H_r$  – гео-

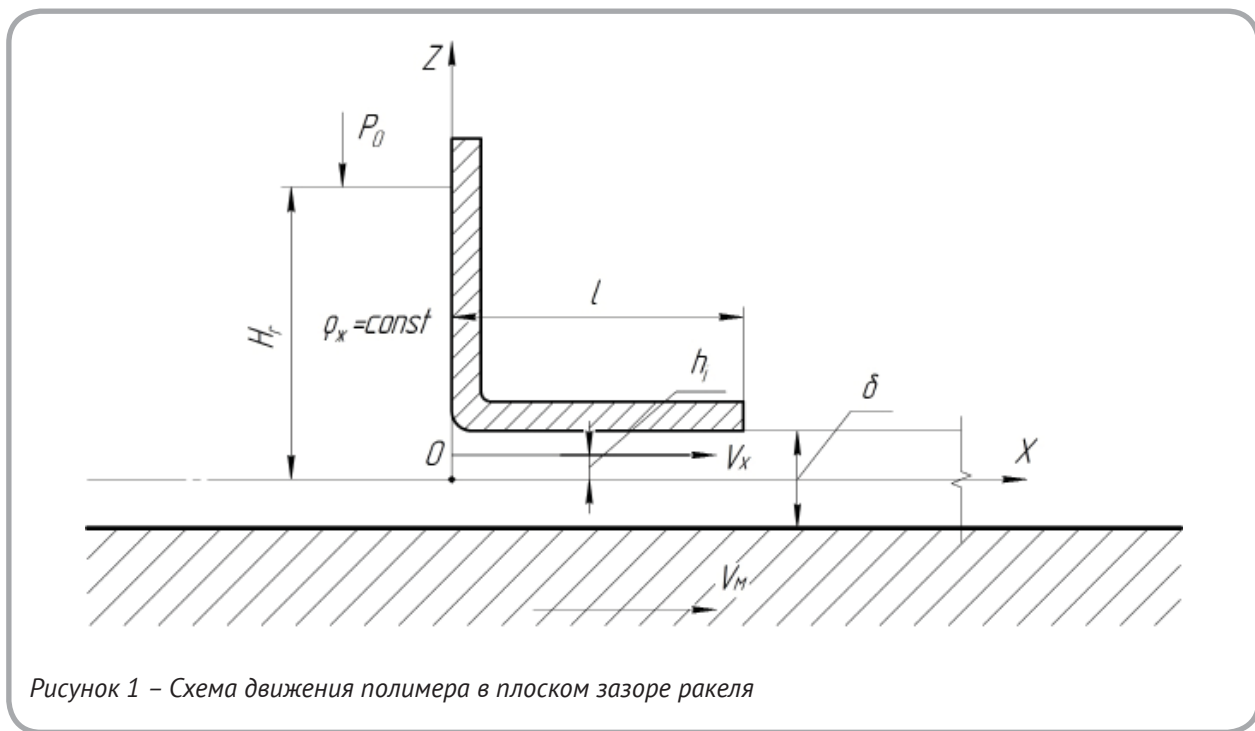


Рисунок 1 – Схема движения полимера в плоском зазоре ракеля

метрическая высота от поверхности резервуара до оси  $OX$ ;  $h_i$  – текущая координата скорости  $V_X$ ;  $V_M$  – скорость движения материала, на которую наносится полимер;  $V_X$  – текущая скорость движения полимера.

Ламинарное течение жидкости в зазоре ракеля является слоистым, поэтому составляющие скорости  $V_Y$  и  $V_Z$  равны нулю. Решение задачи по определению закона изменения скорости  $V_X$  под действием гидростатического давления  $(P_0 + \rho_{ж} g H_r) = const$  выполняется в два этапа. На первом этапе будем рассматривать движение жидкостного полимера под действием гидростатического давления  $((P_0 + \rho_{ж} g H_r) = const)$  при условии, что  $V_M = 0$ . На втором этапе учтем значение скорости,  $V_M$  считая, что её изменение по толщине ракеля имеет линейный характер.

Тогда при условии  $V_M = 0$ , скорость  $V_X = 0$  при  $h_i = -\frac{\delta}{2}$  и при  $h_i = \frac{\delta}{2}$ .

Равномерное ламинарное течение будет выполняться при условии  $F_D \geq F_C$ , где  $F_C = -\mu S \frac{dV_X}{dh}$  [1].

Уравнение равномерного ламинарного течения вязкого несжимаемого полимера, в проекции на ось  $OX$  имеет вид:

$$(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i b \geq -\mu S \frac{dV_X}{dh}, \quad (1)$$

где  $S = l \cdot b$  площадь ламинарного слоя на глубине (высоте)  $h_i$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость полимера (Па · с).

С учетом этого значение  $S$  уравнение (1) имеет вид:

$$(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i b \geq -\mu l b \frac{dV_X}{dh}. \quad (2)$$

Разделяя переменные, дифференциальное уравнение (2) имеет вид:

$$dV_X = -\frac{(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i dh}{\mu l}. \quad (3)$$

Интегрируя, получим

$$V_X = -\frac{(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i^2}{2\mu l} + C. \quad (4)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из граничных условий.

При  $h_i = \pm \frac{\delta}{2}$ ;  $V_X = 0$ , тогда

$$C = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{8\mu} \quad (5)$$

Подставляя значение  $C$  в уравнение (4), получим

$$V_x = \frac{\delta^2}{8\mu} (P_0 + \rho_{жк} g H_r) - \frac{h_i^2}{2\mu} (P_0 + \rho_{жк} g H_r) \quad (6)$$

или

$$V_x = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} (\delta^2 - 4h_i^2) \quad (7)$$

Максимальное значение скорости  $V_x = V_{xmax}$  будет при  $h_i = 0$ , то есть в центре живого сечения потока

$$V_{xmax} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{8\mu} \quad (8)$$

Уравнение закона изменения скорости  $V_x$  показывает, что скорость истечения жидкого вязкого несжимаемого полимера имеет параболический характер (рисунок 2).

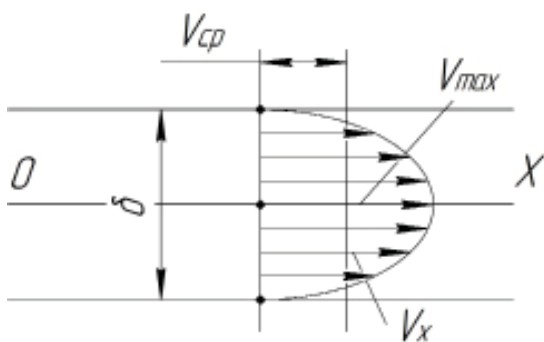


Рисунок 2 - Характер истечения вязкого несжимаемого полимера

Среднее значение скорости, по теореме о среднем равно

$$V_{cp} = \frac{1}{2} V_{max}; V_{cp} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{16\mu} \quad (9)$$

Рассмотрим движение жидкого несжимаемого полимера в плоском зазоре ракеля только

при наличии  $V_M$  (рисунок 3) (второй этап).

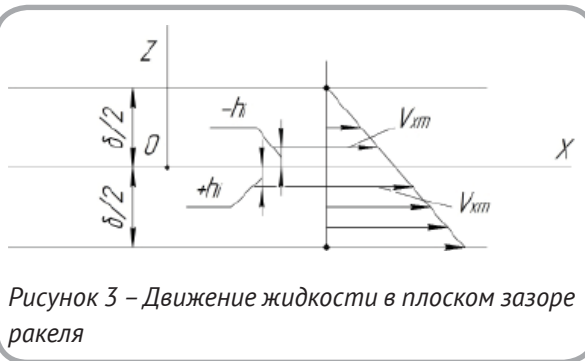


Рисунок 3 - Движение жидкости в плоском зазоре ракеля

$V_{xM}$  – текущее значение скорости в проекции на ось  $Ox$  при скорости материала  $V_M$ . Из условия подобия скоростей, получим

$$V_{xM} = \frac{(0,5\delta \pm h_i) V_M}{\delta} \quad (10)$$

При  $h_i = -\frac{\delta}{2}$   $V_{xM} = 0$ .

При  $h_i = \frac{\delta}{2}$   $V_{xM} = V_M$

Среднее значение скорости  $V_{xM} = V_{Mcp}$  будет при  $h_i = 0$ ,  $V_{Mcp} = 0,5V_M$

Закон изменения скорости течения жидкого вязкого и несжимаемого полимера при ракельном способе нанесения, будет иметь вид:

$$V_x = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} (\delta^2 - 4h_i^2) + \frac{V_M (0,5\delta \pm h_i)}{\delta} \quad (11)$$

Максимальное значение скорости

$$V_{xmax} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} + 0,5V_M \quad (12)$$

Среднее значение скорости течения жидкого несжимаемого вязкого полимера равно:

$$V_{cp} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{16\mu} + 0,5V_M \quad (13)$$

Величина объемного расхода при ракельном способе нанесения полимера равна:

$$Q = V_{cp} \cdot \omega, \quad (14)$$

где  $\omega = \delta \cdot b$  – площадь живого сечения потока жидкого полимера.

С учетом (13) получим

$$Q = \left[ \frac{(P_0 + \rho_{жс} g H_r) \delta^2}{16 \mu l} + 0,5 V_M \right] \cdot \delta b, \quad (15)$$

где  $V_{cp} = V_M$  – скорость транспортирования материала или секундная производительность, (м/с).

Массовый расход равен:

$$Q_0 = Q \cdot \rho_{жс} \left[ \frac{(P_0 + \rho_{жс} g H_r) \delta^2}{16 \mu l} + 0,5 V_M \right] \cdot \rho_{жс} \delta b. \quad (16)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уравнение (16) позволяет решать ряд технологических задач. Например, при заданном расходе  $Q$  или  $Q_0$ , известной конструкции ракеля, то есть известных его геометрических параметров; зная тип полимера и его вязкость, определить скорость транспортирования  $V_M$ , для получения заданной толщины покрытия  $\delta$ .

Для реального технологического процесса производства материала с ПВХ покрытием на тканевой основе определим величину гидростатического напора  $P_0 + \rho_{жс} g H_r$  по заданной производительности  $\Pi = V_M$  и толщине покрытия  $\delta$ . Вначале определим массовую производительность по формуле

$$Q_0 = V_M \cdot \delta \cdot b \cdot \rho_{жс}. \quad (17)$$

Из формулы (16) определим величину гидростатического напора:

$$P_0 + \rho_{жс} g H_r = \frac{16 \mu l}{\delta^2} \left( \frac{Q_0}{\rho_{жс} \delta b} - 0,5 V_M \right). \quad (18)$$

При  $P_0 = P_a$  из формулы (18) определим величину гидростатического давления:

$$H_r = \frac{16 \mu l}{\rho_{жс} g \delta^2} \left( \frac{Q_0}{\rho_{жс} \delta b} - 0,5 V_M \right). \quad (19)$$

Проведем расчет и определим величину столба жидкости.

Исходные данные для расчета:

- динамическая вязкость полимера для производства водоогнетермостойких материалов  $\mu = 27,1 \cdot 10^{-3}$  Па·с;
- линейный размер ракеля  $l = 0,0025$  м;
- объемная плотность при необходимой динамической вязкости  $\rho = 390,1$  кг/м<sup>3</sup>;
- ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;
- толщина наносимого слоя  $\delta = 0,0003$  м;
- ширина ракеля  $b = 1,55$  м;
- скорость транспортирования  $V_M = 0,35$  м/с.

Объемная производительность

$$Q_0 = 0,35 \cdot 0,0003 \cdot 1,55 \cdot 390,1 = 0,06 \text{ кг/с.}$$

Величина высоты столба жидкости:

$$H_r = \frac{16 \cdot 27,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0025}{390,1 \cdot 9,81 \cdot 0,0003^2} \cdot \left( \frac{0,06}{390,1 \cdot 0,0003 \cdot 1,55} - 0,5 \cdot 0,35 \right) = 0,49 \text{ м}$$

Полученные результаты расчета величины столба гидростатического давления  $H_r = \text{const}$  переданы для производства на производственном унитарном предприятии «Гомельобои» (Акт выпуска опытно-промышленной партии материала верха с полимерным покрытием (комбинированного материала с полимерным металлизированным покрытием) от 05 сентября 2013 г.). Высота столба полимера в реальных условиях при производстве комбинированного материала с полимерным металлизированным покрытием составляет 0,5 м.

Полученное значение высоты столба жидкости, реализуемое на производстве, соответствует высоте столба полимера, что свидетельствует о достоверности приведенных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ

1. Альтшуль, А.Д. и др. (1987), *Гидравлика и аэродинамика*, Москва, 414 с.

REFERENCES

1. Altschul, A.D. et al. (1987), *Gidravlika i ajerodinamika* [Hydraulics and Aerodynamics], Stroyizdat, Moscow, 414 p.

*Статья поступила в редакцию 16. 10. 2014 г.*

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В.В. Парманчук, В.И. Ольшанский

УДК 677.027.04

**РЕФЕРАТ**

*МНОГОСЛОЙНЫЙ МАТЕРИАЛ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СВЯЗУЮЩЕЕ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ, ТЕМП ОХЛАЖДЕНИЯ, УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ*

*Объектом исследования является получение многослойного материала с использованием отходов текстильного производства.*

*Целью работы является определение основных теплофизических свойств многослойных материалов, получение методики определения теплофизических характеристик многослойного материала с использованием отходов текстильного производства.*

*Авторами проведены экспериментальные исследования и установлены зависимости основных характеристик текстильных материалов от режимных параметров процесса нанесения мелкодисперсных частиц в условиях воздействия теплового потока.*

*Результаты работы позволяют оперативно определить теплофизические характеристики различных текстильных композиционных материалов, разного способа переплетения, состава и структуры тканей, многослойных материалов, защитной одежды.*

**ABSTRACT**

*MULTILAYERED MATERIAL, THERMAL INSULATION, BINDER, THERMAL CONDUCTIVITY, THERMAL DIFFUSIVITY, RATE OF COOLING, SPECIFIC HEAT*

*The aim of the work is a multilayered textile materials, experimental study and determination of their thermal and physical characteristics. The authors conducted a study of heating textile materials.*

*Analytical dependences to determine coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity of multilayered textile materials, mathematical model for determining the rate of cooling. We investigated the efficiency of fine particles with different technological parameters of this application.*

*The proposed method allows you to define basic thermal and physical characteristics of textile composite materials and their modification in the process of getting the finished thermal insulation material.*

**ВВЕДЕНИЕ**

На предприятиях легкой текстильной промышленности Республики Беларусь около 40 % используемого сырья составляют различные текстильные отходы в виде обрезки, кнопа, мелкодисперсных частиц, которые не используются и загрязняют окружающую среду, обладают низким коэффициентом теплопроводности, что создает предпосылки использования их в качестве теплоизоляционных материалов.

Для увеличения термического сопротивления теплопередачи необходимо использование теплоизоляционных материалов, характеризующихся низкой теплопроводностью, гигроско-

пичностью, температуропроводностью, высокой огнестойкостью, что требует определенной методики их измерения.

В настоящее время существует ряд методов определения теплопроводности материалов:

- метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом (ГОСТ 30256–94);
- метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем (ГОСТ 30290-94);
- радиационный метод;
- метод, основанный на зависимости диэлектрических характеристик материала от его влажности и теплопроводности

(ГОСТ Р 8.621–2006);

- стационарный метод плоского слоя и метод труб.

Методы, основанные на измерении стационарной и нестационарной теплопроводности, делятся на две группы.

Первая группа методов позволяет проводить измерения в широком диапазоне температур (от 20 до 700 °С) и получать более точные результаты.

Недостатком методов измерения стационарного потока тепла является большая продолжительность опыта.

Вторая группа методов позволяет проводить эксперимент в течение нескольких минут (до 1 ч), но применяется для определения теплопроводности материалов при сравнительно низких температурах.

Недостатком методов для определения коэффициента теплопроводности при нестационарном тепловом потоке являются небольшие пределы измерения величины  $\lambda$ . Например методом цилиндрического зонда определяется коэффициент теплопроводности от 0,2 Вт/м<sup>2</sup>°С и выше. Недостатком радиационного метода является громоздкость и сложность оборудования установки. Определение коэффициента теплопроводности приборным методом имеет высокую стоимость.

Анализируя рассмотренные методы измерения, для проведения экспериментальных исследований на базе лаборатории кафедры ТиОМП была собрана экспериментальная установка и разработан экспресс-метод для определения теплофизических свойств материала в кратчайшие сроки.

На белорусском рынке теплоизоляционных материалов представлена продукция как отечественных, так и зарубежных производителей. Номенклатура некоторых отечественных волокнистых теплоизоляционных материалов и их основные теплофизические характеристики представлены в таблице 1.

Продукция зарубежных производителей представлена широкой номенклатурой волокнистых теплоизоляционных материалов фирм: «Сан-Гобэн Изовер» (Финляндия), «Rockwool» (Дания), «УРСА-Евразия» «Partek Paroc» (Финляндия), «Izomat» (Словакия). Эффективным

теплоизоляционным материалом является пеностекло «Foamglas» бельгийской фирмы «Pittsburgh Corning» – формованный материал (плиты, сегменты) с закрытыми порами, негорючий, с температурой применения от -260 до +485 °С и высокими прочностными свойствами.

С целью снижения затрат на производство и утилизацию отходов (экологический аспект) возникает необходимость в производстве теплоизоляционных материалов на базе отходов в виде нетканого полотна.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является оценка теплофизических свойств теплоизоляционных текстильных материалов и их сравнительный анализ, позволяющий определить основные рекомендации их применения в инженерной практике.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для производства многослойных теплоизоляционных материалов необходимо ориентироваться на местное сырье (импортозамещающий аспект) на низкосортных и не утилизируемых текстильных отходов (кноп, коротковолокнистые текстильные отходы, содержимое пылевых камер и др).

Технологический процесс производства теплоизоляционного материала может быть представлен в виде следующей схемы:

- приготовление раствора связующего;
- подготовку текстильных отходов;
- смешивание;
- формирование изделия;
- сушку;
- резку.

При выборе схемы расчета теплопроводности необходимо учитывать число слоев, форму и размеры изделий, характеристики используемых материалов, температурный градиент.

Принимаем, что температура  $t$  поверхности во всех точках одинакова или незначительно изменяется. Исследуемые образцы имеют форму пластины, следовательно, можно ограничиться расчетом одномерной задачи теплопроводности для плоской стенки.



Таблица 1 – Основные теплофизические характеристики теплоизоляционных материалов

<b>Маты прошивные из минеральной ваты теплоизоляционные ГОСТ 21880–94</b>				
Маркировка материала	75	100	125	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	85	85-110	110-135	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) 298±5 398±5 579±5	0,046	0,044 0,065 0,150	0,044 0,064 0,130	
<b>Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем ГОСТ 9573–96</b>				
Маркировка материала	75	125	175	225
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	75	125	175	225
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) 298±5 398±5	0,047 0,077	0,049 0,072	0,052 0,07	0,054
<b>Маты теплоизоляционные из минеральной ваты вертикально-слоистые ГОСТ 23307–78</b>				
Маркировка материала	75		125	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	От 50 до 75		От 75 до 125	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) 298±5 398±5	0,048 0,083		0,046 0,081	
<b>Пакеты прошивные теплоизоляционные СТБ 1273–2001</b>				
Маркировка материала	75	100	150	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	От 85 до 110	От 110 до 135	От 135 до 165	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) 298±5 398±5 579±5	0,044 0,065 0,130	0,044 0,065 0,130	0,049 0,072 0,150	
<b>Теплоизоляционные базальтовые цилиндры, покрытые фольгой ГОСТ 23208–82</b>				
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	70-100			
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) при 25 С	0,037			
<b>Изделия теплоизоляционные из стеклянного штапельного волокна ГОСТ 10499–95</b>				
Коэффициент теплопроводности при (25±5)С, Вт/(м*К)	0,057	0,052	0,047	

Коэффициент теплопроводности находится из соотношения

$$\lambda = \frac{Q}{t_{c1} - t_{c2}} K, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $K$  – коэффициент формы исследуемого материала, для неограниченного плоского тела рассчитывается по формуле

$$K = \delta / F_p, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина плоского слоя, м;  $F_p$  – расчетная поверхность, нормальная к направлению теплового потока, м<sup>2</sup>.

В нестационарном режиме зависимость температурного поля от времени описывается показательной функцией [1]. Темп охлаждения и на-

грева  $m$  характеризует относительную скорость изменения температуры тела во времени. Относительная скорость изменения температуры при переходе от одной точки тела к другой остается постоянной. Поэтому если закон регулярного режима графически представить в логарифмических координатах относительной температуры, то изменение температуры со временем для различных точек тела выразится системой параллельных линий:

$$\ln \vartheta = \ln(AU) - m. \quad (3)$$

Темп охлаждения характеризует угловой коэффициент этих параллельных линий, что позволяет получить следующую зависимость для практического способа определения величины темпа охлаждения:

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (4)$$

Для определения темпа охлаждения достаточно ограничиться заделкой одной термопары в произвольном месте исследуемого тела. При этом тарировка термопар не обязательна, если зависимость их термо-э.д.с. от температуры является линейной.

Установлено, что коэффициент температуропроводности а сильнее зависит от  $\Delta t$  при малых значениях  $\Delta t$ , чем при больших. Так, при  $\Delta t$  до  $5^\circ \text{C}$  отклонения от среднего значения коэффициента теплоотдачи составляют  $\pm 14,4 \%$ , а при  $\Delta t = 65 \div 70^\circ \text{C}$  – всего  $+ 0,7 \%$ . В этих случаях опыты рекомендуется проводить при перепадах температур порядка  $40\text{--}45^\circ \text{C}$  [2].

Коэффициент температуропроводности плохих проводников тепла, при условии, что  $Bi = \infty$  (практически  $Bi \geq 100$ ), можно определить из выражения

$$a = K^* m_\infty, \quad (5)$$

где  $K^*$  – коэффициент формы, характеризующий геометрическую форму и размеры тела.

Коэффициент формы для неограниченной пластины

$$K^* = (2\delta/\pi)^2, \quad (6)$$

где  $\delta$  – толщина пластины, м.

Исследование коэффициента теплопроводности проводится на установке для определения величины коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, изображенной на рисунке 1.

Исследуемому материалу придается форма относительно тонкой квадратной пластины 5. Температурный перепад создается за счет теплового электронагревательный элемента (ТЭН) 3, помещенного в теплоизолированную камеру 2, для обеспечения одномерного постоянного теплового потока. Мощность теплового потока  $Q$  (Вт) равна значению мощности, затрачиваемой на нагревание ТЭН, и измеряется непосредственно ваттметром 4.

Значение мощности теплового потока  $Q$  задается автотрансформатором 1. Значения температур поверхностей исследуемого материала определяется с помощью термопар 6, горячие спаи которых зашиваются как со стороны воздействующего теплового потока (воздействующий на нижний слой), так и со стороны, не подвергаемой тепловому воздействию (верхний

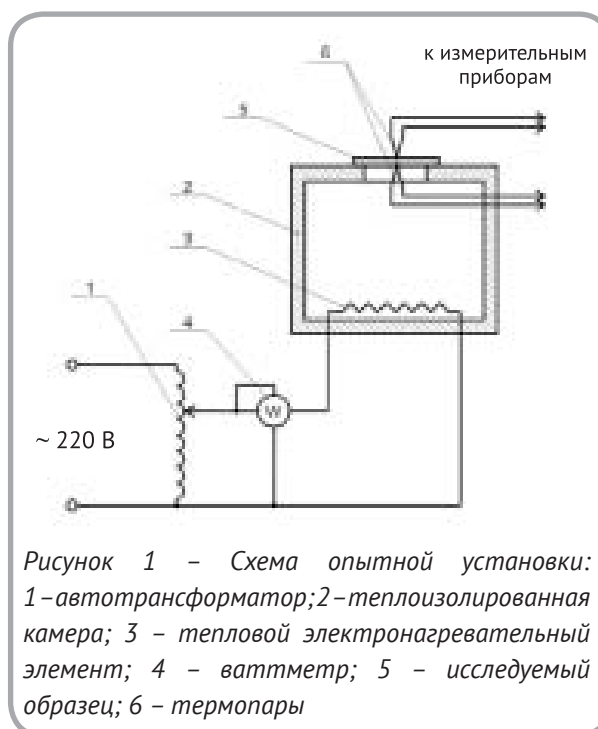


Рисунок 1 – Схема опытной установки: 1 – автотрансформатор; 2 – теплоизолированная камера; 3 – тепловой электронагревательный элемент; 4 – ваттметр; 5 – исследуемый образец; 6 – термопары

слой).

Для обеспечения постоянного теплового потока после включения опытной установки в питающую сеть её необходимо прогреть в течение 15–20 минут. Образец должен полностью, без зазоров закрывать окно теплоизолированной камеры, так как ошибка из-за контактного сопротивления может достигать 30 %. Значения температур фиксируются через равные промежутки времени, по возможности максимально короткие.

Проведение опыта прекращается при достижении скорости изменения температуры на обеих сторонах образца не более 1 °С/мин.

Для испытания были представлены следующие образцы:

Пакет № 1 – смесовая ткань «Грета», иглопробивное полотно, сатиновая подкладка (вискоза на хлопчатобумажной основе).

Пакет № 2 – Стеклопластик (РСТ), слой мелкодисперсного материала, стеклоткань + связующее (клей ADCOTE 675A+675C).

Пакет № 3 – Стеклопластик (РСТ), слой мелкодисперсного материала (отходы коврового производства), стеклоткань, слой мелкодисперсного материала (отходы коврового производства), стеклопластик (РСТ) + связующее.

Составляющие пакетов материалов выкраиваются в прямоугольном виде размеров 220х220 мм, скрепляются по трем сторонам и вставляется порядковый номер образца пакета материала.

Рассмотрим алгоритм расчета коэффициента теплопроводности для трехслойных образцов. В результате проведения эксперимента формируются исходные данные для расчета требуемого показателя.

Перед началом проведения опыта были проведены измерения начального значения температуры поверхностей образцов  $T_0, °C$  и средней толщины пакетов материалов  $\delta, м$ .

Образец 1 –  $T_0 = 16 °C, \delta = 0.003 м$ ;

Образец 2 –  $T_0 = 16 °C, \delta = 0.002 м$ ;

Образец 3 –  $T_0 = 16 °C, \delta = 0.003 м$ .

Дополнительно были произведены замеры: мощность теплового потока  $Q = 240 Вт$ , расчетная поверхность, нормальная к направлению теплового потока  $F_p = 0.04 м^2$  (рисунок 2).

Таким образом, по нескольким последним значения температуры поверхности произво-

дится линейная аппроксимация и определяется разность температур  $\Delta T_1 = 49.42 °C, \Delta T_2 = 68.73 °C, \Delta T_3 = 117.8 °C$ . Далее рассчитывается коэффициент формы для данного образца по формуле (2). По формуле (1) рассчитывается коэффициент теплопроводности.

По формуле (6) рассчитывается коэффициент формы для определения коэффициента температуропроводности.

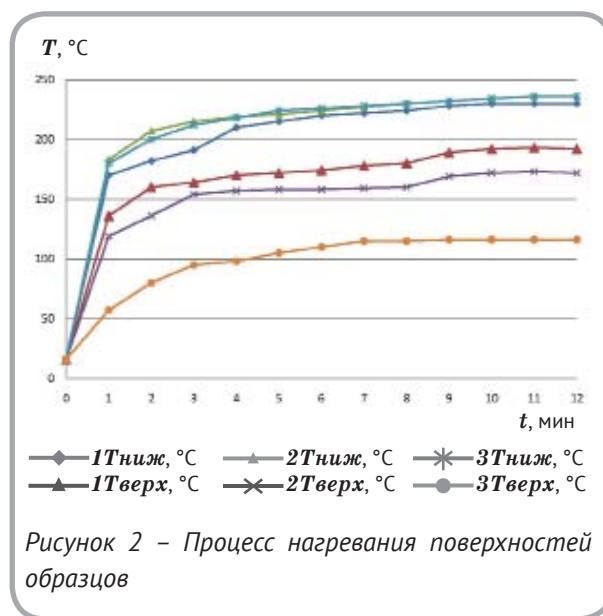


Рисунок 2 – Процесс нагревания поверхностей образцов

По логарифмированной линейной модели определяется темп охлаждения для двух произвольных значений времени (рисунок 3).



Рисунок 3 – Определение темпа охлаждения

Значение температуропроводности определяется по формуле (5).

Основные усредненные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и коэффициента температуропроводности  $\alpha$  представлены в

таблице 2.

Сравнительный анализ основных теплофизических характеристик показывает, что наиболее рациональным для использования в качестве теплоизоляционного материала является пакет № 2, у которого наиболее низкий коэффициент температуропроводности и коэффициент теплопроводности.

Кроме указанных теплофизических характеристик к теплоизоляционным материалам в соответствии с ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные» предъявляется требование устойчивости во времени к воздействию теплового потока.

При исследовании на устойчивость к воздействию теплового потока пакет материала считается выдержавшим испытания, если на образце не произошло:

- разрушения наружной поверхности (трещин, прогара, оплавления и т. д.);
- усадки более 5 %;
- воспламенения;
- превышения среднеарифметического значения температуры на внутренней поверхности композиции слоев более 50 °С в нормированное время;
- увеличения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов до значения, превышающего 2.5 кВт/м<sup>2</sup> в нормированное время.

Анализ показывает, что по показателю плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов все скомплектованные образцы выдержали испытание, ткань верха пакета материалов всех образцов в ходе проведения испытаний не подверглась видимым повреждениям, полученные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности не превышают показаний промышленных образцов, применяемых в промышленности.

Предложенная методика позволяет оперативно определить теплофизические характеристики и устойчивость во времени к воздействию теплового потока различных текстильных композиционных материалов, разного способа переплетения, состава и структуры тканей, многослойных материалов, защитной одежды, тем самым определяется область применения существующих и вновь проектируемых материалов.

Таблица 2 – Усредненные значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности

Образцы материалов	Коэффициент формы $K$ , м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м*К)	Коэффициента формы $K'$ , м <sup>2</sup>	Коэффициент температуропроводности $\alpha$
Пакет 1	0.075	0,055	$0.365 \cdot 10^{-5}$	$0.183 \cdot 10^{-6}$
Пакет 2	0.05	0,035	$0.162 \cdot 10^{-5}$	$0.081 \cdot 10^{-6}$
Пакет 3	0.075	0,046	$0.365 \cdot 10^{-5}$	$0.183 \cdot 10^{-6}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. (1967), *Теория теплопроводности*, Москва, Высшая школа, 600 с.
2. Осипов, В.А. (1969), *Экспериментальное исследование процессов теплообмена*, Москва, Энергия, 391 с.

## REFERENCES

1. Lykov, A.V. (1967), *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow, Higher school, 600 p.
2. Osipov, V.A. (1967), *Eksperimental'noe issledovanie processov teploobmena* [Experimental study of heat exchange processes], Moscow, Energy, 391 p.

Статья поступила в редакцию 27.02.2014 г.

**ТРЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

В.В. Пятов

УДК 621.762

**РЕФЕРАТ**

*ПОРОШОК, ТРЕНИЕ, ТРИБОМЕТР, БОКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, ПЛАСТИФИКАТОР*

*Описана новая оригинальная методика измерения коэффициентов бокового давления порошковых материалов косвенным методом, без использования тензометрии. Изготовлен порошковый трибометр, позволяющий реализовать предложенную методику. Приведены примеры измерения коэффициентов бокового давления для ряда порошков. Исследована зависимость коэффициентов бокового давления металлических порошков от давления прессования и концентрации пластификатора в материале. Показано, что коэффициенты бокового давления растут с увеличением давления прессования, причем рост ослабевает с увеличением степени пластификации порошка.*

**ABSTRACT**

*POWDER, FRICTION, TRIBOMETER, LATERAL PRESSURE, THE PROCEDURE OF MEASURING, PLASTICIZER*

*Description of the original method for measuring the coefficient of lateral pressure powders is given. The examples of measurements of lateral pressure coefficients for a number of powders are given. The dependence of the coefficient of lateral pressure metallic powders by compaction pressure and concentration of plasticizer in the material is investigated. It is shown that the coefficient of lateral pressure increases with increasing compaction pressure and growth decreases with increasing degree of plasticizer powder.*

Проектирование формующего инструмента, от простой прессформы до сложных шнековых устройств, основано на моделировании процесса уплотнения порошка и проведении технических расчетов по построенным моделям. Для осуществления расчетов необходимо знание физических и технологических характеристик материала, используемых в выбранной модели.

Теоретические модели процессов формования порошков обычно используют такие триботехнические характеристики материала, как коэффициент его внешнего трения о поверхность инструмента, коэффициент внутреннего межчастичного трения и коэффициент бокового давления. В статье описана оригинальная методика измерения коэффициентов бокового давления порошка косвенным методом без использования тензометрии.

Как известно, порошок передает приложенное к нему давление в разных направлениях по-разному. Так, при одноосном нагружении порошкового материала в прессформе давление

на боковой поверхности формы будет меньше, чем под пуансоном. Количественно это явление характеризует коэффициент бокового давления, представляющий собой отношение наименьшего и наибольшего главных нормальных напряжений при одноосном сжатии материала. Он широко используется в технических расчетах на прочность и износостойкость формующего инструмента, а также при анализе процесса деформации порошков. В порошковой металлургии коэффициент бокового давления обычно измеряют с использованием тензометрии [1]. Такой подход имеет существенные недостатки, главные из которых – низкая точность измерения и плохая воспроизводимость результатов. Связано это со сложностью тарирования тензодатчика и юстировки передающего усилие штифта. При исследовании пластифицированных порошков использование тензометрии неэффективно, так как выдавливаемый пластификатор фиксирует штифт, затрудняет его перемещение и датчик перестает адекватно реагировать на изменение

давления.

Схема измерения коэффициента бокового давления [2 – 3] приведена на рисунке 1.

Исследуемый материал сжат в цилиндрической прессформе, состоящей из неподвижного нижнего пуансона, подвижного верхнего пуансона и матрицы, установленной с возможностью вращения. На схеме коэффициенты трения материала о пуансон и матрицу обозначены  $f_n$  и  $f_m$ , а давление материала на поверхности пуансона и матрицы –  $\sigma_n$  и  $\sigma_m$ .

где  $M$  – момент, необходимый для начала вращения матрицы;  $V$  – объем, занимаемый материалом в момент измерения.

Выражение (2) получено из условия равновесия

$$M = \tau r S_\phi = 2 f_m \sigma_m V, \quad (3)$$

где  $\tau = f_m \sigma_m$  – касательные напряжения, действующие на боковой поверхности материала

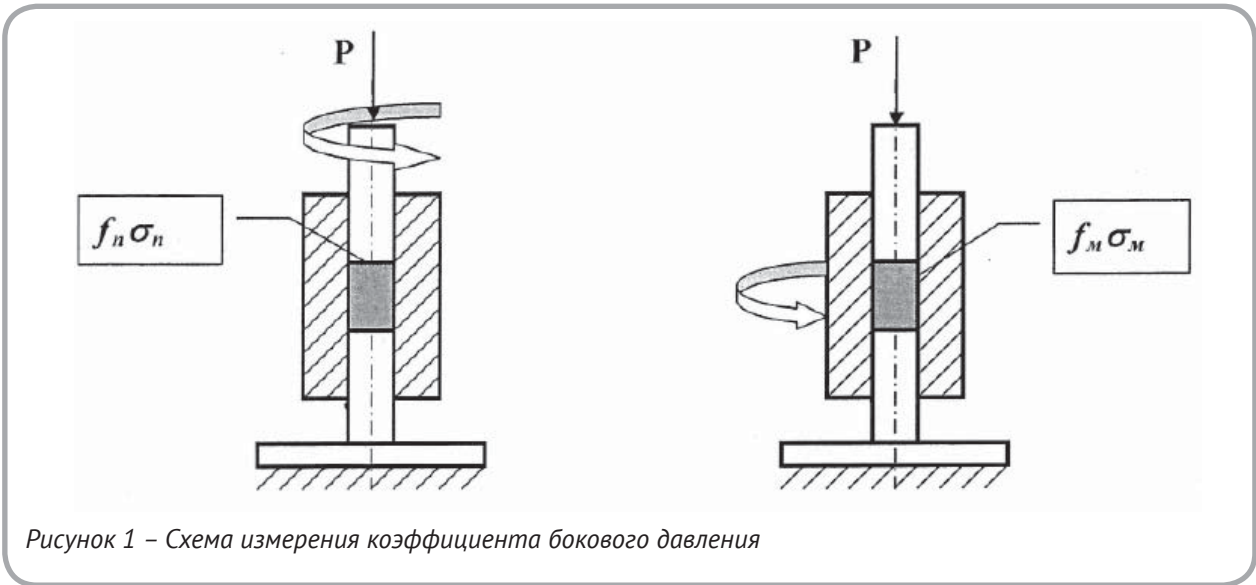


Рисунок 1 – Схема измерения коэффициента бокового давления

Сначала снимают зависимость произведения  $f_n \sigma_n$  от давления прессования  $\sigma_n$ :

$$f_n \sigma_n = F(\sigma_n). \quad (1)$$

Функцию  $F$  находят аппроксимацией или просто строят график и используют его при дальнейших расчетах. На этом этапе необходимо обеспечить неподвижность материала относительно матрицы. Для фиксации материала удобно использовать нижний пуансон с рифленным торцом.

Затем измеряют сопротивление вращению матрицы при тех же нагрузках и вычисляют произведение

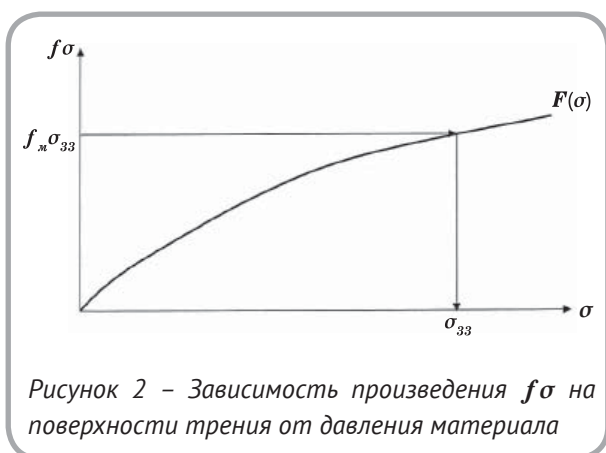
$$f_m \sigma_m = M/2V, \quad (2)$$

при вращении матрицы;  $S_\phi = 2\pi r h$  – площадь этой поверхности в момент измерения;  $r$  – радиус пуансонов;  $h$  – текущая высота прессовки.

Важным условием правильного измерения является равенство коэффициентов трения порошка о матрицу и верхний пуансон. Если это условие соблюдается, зависимости  $F(\sigma_n)$  и  $F(\sigma_m)$  будут идентичными, то есть функция  $F$  и в том, и в другом случае одна и та же. Тогда можно упростить обозначения:

$$f\sigma = f_n \sigma_n = f_m \sigma_m = F(\sigma), \quad (4)$$

где  $f\sigma$  – произведение, характеризующее воздействие материала на произвольную поверхность, имеющую те же характеристики, что и поверхности деталей прессформы (верхнего пуансона и матрицы). На рисунке 2 изображена зависимость  $f\sigma = F(\sigma)$ .



На рисунке 2  $\sigma_{33}$  – нормальное напряжение на боковой поверхности, которая, вообще говоря, может располагаться под любым углом к направлению приложенного усилия  $P$ ; для рассмотренной простейшей схемы  $\sigma_{33} = \sigma_m$ .

График  $f\sigma = F(\sigma)$  позволяет определить давление материала на любую поверхность, если

известно произведение  $f\sigma$  на этой поверхности. В частности, можно найти боковое давление  $\sigma_{33}$  и соответствующий коэффициент бокового давления. Если для функции  $F$  подобрана аппроксимация, то эта задача может быть решена аналитически.

Результаты измерения коэффициентов бокового давления для различных порошков, пластифицированных парафином, представлены в таблицах 1–4.

Видно, что измеренные коэффициенты неравномерно растут с увеличением давления прессования. У непластифицированных порошков коэффициенты бокового давления при давлении 150 МПа отличаются почти в два раза (0,40 – у меди и 0,21 – у вольфрама). У высокопластифицированных порошков это различие не превышает 10 %. Свойства материала в этом случае в основном определяются составом и концентрацией пластификатора.

Таблица 1 – Коэффициенты бокового давления медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.36	0.45	0.53	0.60	0.66	0.71
150	0.40	0.47	0.56	0.63	0.70	0.76
250	0.42	0.49	0.58	0.65	0.72	0.78

Таблица 2 – Коэффициенты бокового давления железного порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.32	0.42	0.51	0.59	0.66	0.70
150	0.34	0.44	0.53	0.61	0.68	0.73
250	0.36	0.46	0.55	0.63	0.70	0.75

Таблица 3 – Коэффициенты бокового давления стального порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.28	0.38	0.47	0.55	0.62	0.67
150	0.30	0.40	0.49	0.57	0.64	0.70
250	0.32	0.42	0.51	0.59	0.66	0.71



Таблица 3 – Коэффициенты бокового давления вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.19	0.30	0.39	0.47	0.54	0.60
150	0.21	0.32	0.41	0.49	0.58	0.65
250	0.23	0.34	0.43	0.60	0.60	0.68

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жданович, Г.М. (1969), *Теория прессования металлических порошков*, Москва, Металлургия, 160 с.
2. Пятов, В.В. (2002), *Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов*, Витебск, 237 с.
3. Пятов, В.В., Ахтанин, О.Н., Клименков, С.С., Голубев, А.Н. (2003), *Способ определения коэффициента бокового давления*, Патент 5665 С1 ВУ, МПК G 01L 7/00, 2003, № 5.

## REFERENCES

1. Zhdanovich, G. (1969), *Teorija pressovanija metallicheskih poroshkov* [Theory pressing metal powders], Moscow, 160 p.
2. Pyatov, V. (2002), *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy holodnoj jekstruzii poroshkovyh materialov*, [Theoretical and technological bases of cold extrusion powder new materials], Vitebsk, 237 p.
3. Pyatov, V., Ahtanin, O., Klimenkov, S., Golubev, A. (2003), *The method of determining the coefficient of lateral pressure* [Sposob opredelenija kojefficienta bokovogo davlenija], Patent 5665 C1 BY, IPC G 01L 7/00, 2003, № 5.

Статья поступила в редакцию 16. 12. 2013 г.

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СТЕПЕНЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ АРМИРОВАННЫХ НИТЕЙ

Н.В. Ульянова, Д.Б. Рыклин

УДК 677.072:687.023

### РЕФЕРАТ

*АРМИРОВАННАЯ ПОЛИЭФИРНАЯ НИТЬ, ПОЛИЭФИРНОЕ ВОЛОКНО, КРУТКА, УКРУТКА, НЕРОВНОТА, ШВЕЙНЫЕ НИТКИ*

*Объект исследований – армированные полиэфирные нити линейной плотности 16,7 текс для швейных ниток 35 ЛЛ.*

*Определено влияние основных факторов, влияющих на прочность сцепления волокнистого покрытия армированной полиэфирной нити для швейных ниток торгового номера 35 ЛЛ со стержневым компонентом по всей длине.*

*Установлены следующие факторы, влияющие на прочность сцепления волокнистого покрытия в армированной нити со стержневым компонентом: состав компонентов в армированной нити; количество и характер расположения волокон оплетки в покрытии сердечника; крутка; натяжение комплексной нити; степень закрепления оплетки на комплексной нити.*

*Экспериментально получена зависимость укруптки стержневого компонента армированной полиэфирной нити от крутки, установленной на модернизированной кольцевой прядильной машине при ее формировании. Установлено, что укруптка комплексной нити при крутке, в прядении равной 730 кр/м, составляет 2 %.*

*Произведён расчет параметров армированной полиэфирной нити линейной плотности 16,7 текс для швейных ниток. Определена сила нормального давления полиэфирных волокон оплетки на стержневой компонент армированной полиэфирной нити и сила трения, возникающая между комплексной нитью и волокнистым покрытием армированной полиэфирной нити.*

*Установлено влияние крутки и неровноты по линейной плотности волокнистого покрытия на степень закрепления волокнистого покрытия на поверхности армированной полиэфирной нити.*

### ABSTRACT

*CORE-SPUN POLYESTER YARNS, POLYESTER FIBER, TWIST, TWIST CONTRACTION, EVENNESS, SEWING THREADS*

*The factors were determined which affect to the fixing of the fibrous covering of core-spun yarns: the composition of components in the yarn, the number of fibers in the covering layer, twist, tension of filament yarn.*

*Experimentally the dependence of twist contraction of the core of polyester yarn on twist was developed. Parameters of core-spun yarns of linear density 16.7 tex for sewing threads were calculated. It is determined the pressure of polyester fibers on the core component and friction force among them.*

*It was investigated the influence of yarn twist and evenness on the fixing degree of fibrous covering on the surface of core-spun yarn.*

Одной из основных проблем, возникающих при переработке армированных полиэфирных швейных ниток, является их обрывность в процессе шитья на высокоскоростном швейном оборудовании (им сегодня оснащены потоки швейных предприятий), обусловленная слабой связью волокон оплетки со стержневой нитью. Недостаточное закрепление волокнистой мычки на сердечнике приводит к сползанию оплетки и, следовательно, к ухудшению пошивочных свойств готовых швейных ниток и качества строчки (рисунок 1).



Рисунок 1 – Микроскопический снимок армированной полиэфирной нити

Осуществляя анализ литературных источников и результатов исследований, полученных Мигушовым И.И [1], К.И. Корицким [2], А.Г. Коганом [3], Чернавиной Л.М. [4] и другими исследователями по данной задаче, были выявлены основные факторы, влияющие на качественные показатели армированной нити. К таковым относятся состав компонентов в армированной нити, количество и характер расположения волокон оплетки в покрытии сердечника, крутка, натяжение комплексной нити при формировании армированной нити. Однако, несмотря на значительное количество работ по указанной проблеме, результаты исследований влияния вышеперечисленных факторов на степень закрепления волокнистого полиэфирного покрытия на поверхности комплексной полиэфирной армированной нити не получили до настоящего времени освещения в литературе. Вследствие этого проведение исследований по данному направлению является актуальной научно-практической задачей.

Объектом исследований в данной работе являлись армированные полиэфирные нити линейной плотности 16,7 текс, применяемые для

производства швейных ниток торгового номера 35 ЛЛ.

На начальном этапе исследований рассмотрим поперечное сечение армированной полиэфирной нити кольцевого способа формирования, полагая, что волокна в нем располагаются в виде концентрических окружностей (слоев) вокруг комплексной нити, то есть оси волокон представляют собой спирали постоянного радиуса (рисунок 2).

В случае армированных ниток их прочностные свойства обеспечиваются, в первую очередь, соответствующими характеристиками стержневого компонента. Линейная плотность стержневого компонента определяет его долю в структуре армированной нити, что влияет на формирование полного покрытия комплексной нити волокном.

Доказано, что для комбинированных нитей, волокнистое покрытие которых состоит из хлопковых волокон, массовая доля комплексной нити в их составе не должна превышать 30 % [3]. Однако в связи с повышенной равномерностью полиэфирных волокон по свойствам, а также по причине высоких требований, предъявляемых к прочности швейных ниток, это условие может не выполняться. Массовая доля комплексной нити в составе исследуемой армированной полиэфирной нити составляет 66 %, соответственно, доля волокнистого покрытия – 34 %, что достаточно для обеспечения высоких физико-механических свойств армированной швейной нитки ЛЛ, а также ее высоких технологических показателей при пошиве.

Для того чтобы волокна оплетки равномерно покрывали поверхность сердечника и хорошо на нем закреплялись, необходимо рассчитать число волокон, достаточное для покрытия комплексной нити.

Теоретически установлено, что число волокон ( $n_{min}$ ), обеспечивающее покрытие комплексной нити в один слой при условии, что волокна расположены параллельно оси комплексной нити, может быть рассчитано по формуле [5]

$$n_{min} = \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{\sqrt{T_B/\gamma_1}}{\sqrt{T_B/\gamma_1 + \sqrt{T_{KH}/\gamma_2}}}\right)}, \quad (1)$$

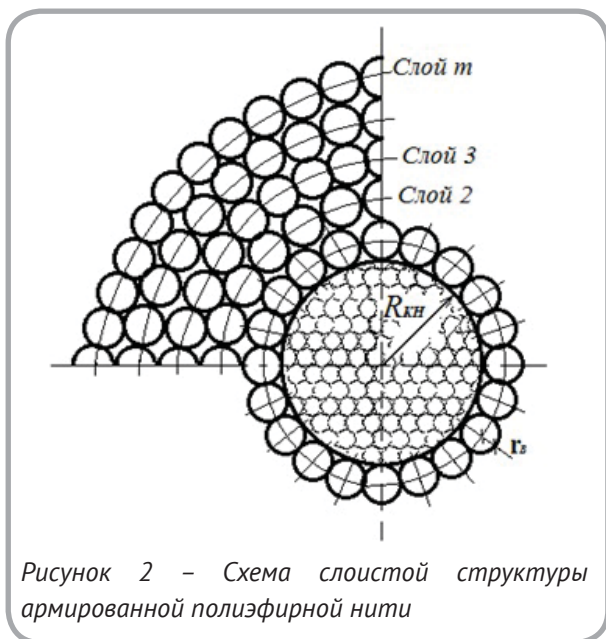


Рисунок 2 – Схема слоистой структуры армированной полиэфирной нити

где  $T_B$  – линейная плотность волокна, текс;  $T_{кн}$  – линейная плотность комплексной химической нити, текс;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – соответственно, объемная плотность волокна и комплексной химической нити, г/см<sup>3</sup>.

Для армированных полиэфирных нитей для швейных ниток ЛЛ принимаем, что  $\gamma_1 = \gamma_2$ , тогда формула (1) приобретает вид:

$$n_{min1} = \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{1}{1 + \sqrt{T_{кн}/T_B}}\right)} \quad (2)$$

Минимально допустимая линейная плотность волокнистого покрытия ( $T_{ВПmin}$ ) рассчитывается по формуле

$$T_{ВПmin} = T_B \cdot n_{min} \quad (3)$$

Произведем расчет параметров армированной полиэфирной нити для швейных ниток ЛЛ по формулам (2 и 3) с учетом различных комбинаций линейных плотностей 11,0 и 13,3 текс комплексных нитей, используемых в качестве сердечника и полиэфирных волокон покрытия линейной плотности 0,11 и 0,133 текс. Результаты расчета параметров армированной нити для швейных ниток ЛЛ представлены в таблице 1.

Таким образом, при линейной плотности армированной полиэфирной нити 16,7 текс покры-

тие стержневой нити волокнистым слоем достигается только при использовании комплексной нити линейной плотности 11,0 текс и полиэфирных волокон линейной плотности 0,11 текс. Применение волокон линейной плотности 0,11 текс, в отличие от полиэфирных волокон покрытия 0,133 текс, позволяет повысить их количество в сечении нити с 43 до 52, что ведет к существенному снижению неровности оплетки по линейной плотности, обеспечивая полное покрытие нити волокном. Кроме того, в армированной нити увеличивается площадь взаимно соприкасающихся полиэфирных волокон и, следовательно, увеличивается сила трения.

В связи с этим для получения армированной полиэфирной нити для швейных ниток торгового номера 35 ЛЛ в качестве оплетки было предложено использовать полиэфирное волокно линейной плотности 0,11 текс, длиной резки 38 мм производства ОАО «МогилевХимволокно». Наиболее предпочтительным вариантом для использования в качестве стержневого компонента армированных нитей является высокопрочная полиэфирная комплексная нить линейной плотности 11,0 текс фирмы «Торлен» (Польша). Она обладает более высокой прочностью и меньшим удлинением, чем вискозная и полиамидная нить, а также характеризуется достаточной термостойкостью и стойкостью к истиранию.

Определим параметры структуры армированной полиэфирной нити (рисунок 3). Для этого рассчитаем условный диаметр волокна  $d_B$ , мм по формуле [5]

$$d_B = 0,0357 \cdot \sqrt{T_B/T_{кн}} = 0,0357 \sqrt{0,11/1,38} = 0,01, \quad (4)$$

где  $T_{кн}$  – плотность полиэфирных волокон и нитей, г/см<sup>3</sup>.

Тогда радиус полиэфирного волокна оплетки  $r_B$  составит 0,005 мм.

Аналогично приведенной ранее формуле (4) условный диаметр комплексной полиэфирной нити  $d_{кн}$  составит 0,101 мм. Соответственно радиус комплексной нити  $R_{кн}$  будет равен 0,05 мм. Также путем подстановки в данную формулу значения линейной плотности армированной полиэфирной нити ( $T_{АРМН} = 16,7$  текс) вместо линейной плотности волокон ( $T_B$ ) можно рас-

Таблица 1 – Результаты расчета параметров армированной нити для швейных ниток ЛЛ

Линейная плотность стержневой нити, текс	Линейная плотность волокон покрытия, текс	Минимальное количество волокон покрытия, рассчитанное по формуле (2)	Минимальная линейная плотность волокнистого покрытия, рассчитанная по формуле (3), текс	Минимальная линейная плотность армированной нити, текс
11,0	0,11	34,5	3,8	14,8
11,0	0,133	31,6	4,2	15,2
13,3	0,11	37,6	4,1	17,4
13,3	0,133	34,5	4,6	17,9

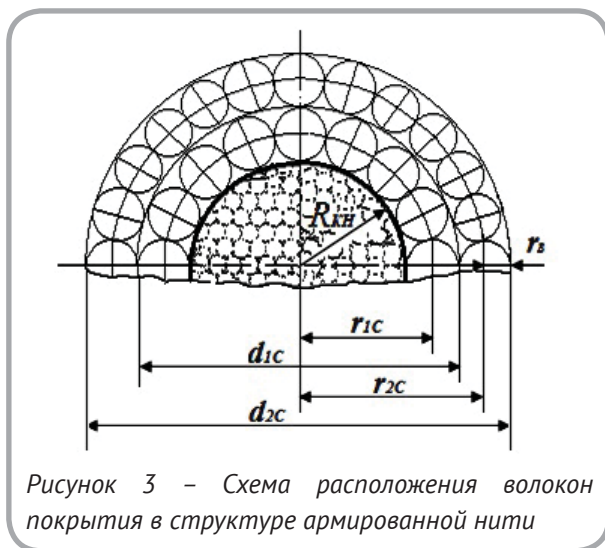


Рисунок 3 – Схема расположения волокон покрытия в структуре армированной нити

$$n_{общ} = T_{онл} / T_B = 5,7 / 0,11 = 51,8. \quad (6)$$

Таким образом, из расчета видно, что в волокнистом покрытии линейной плотности 5,7 текс армированной полиэфирной нити линейной плотности 16,7 текс содержится порядка 52 волокон линейной плотности 0,11 текс, что значительно ниже суммарного расчетного количества волокон первого и второго слоя  $n_{с1,2}$ , равного:

$$n_{с1,2} = n_{мин1} + n_{мин2} = 34,5 + 39,5 = 74. \quad (7)$$

считать ее условный диаметр ( $d_{АРМН}$ ), который составит 0,124 мм.

При снижении средней линейной плотности одиночной полиэфирной армированной нити (16,7 текс) до минимального значения 14,8 текс изменяется количество волокон в оплетке. Предположим, что некоторая часть волокон покрытия располагается во втором слое. Рассчитаем количество волокон  $n_{мин2}$ , необходимое для покрытия поверхности комплексной нити во втором слое:

$$n_{мин2} = \frac{\pi}{\arcsin \left( \frac{1}{1 + \sqrt{(T_{KH} + n_{мин1} \cdot T_B) / T_B}} \right)}. \quad (5)$$

Исходя из отношения линейной плотности оплетки ( $T_{онл} = 5,7$  текс) к линейной плотности полиэфирного волокна можно рассчитать общее количество волокон оплетки  $n_{общ}$  для армированной нити линейной плотности 16,7 текс для швейных ниток ЛЛ:

Предположим, что для покрытия стержневой комплексной нити, входящей в состав армированной нити, необходимо два неполных слоя покрытия. При дальнейших расчетах необходимо учесть, что количество волокон оплетки неполного второго слоя  $n_{мин2}$  будем считать равным 17,3.

Исходя из приблизительно цилиндрической формы, которую принимает армированная полиэфирная нить, рассчитаем радиус  $r_{1C}$  (мм), равный расстоянию от оси комплексной нити до оси волокон оплетки первого слоя:

$$r_{1C} = R_{KH} + r_B = 0,05 + 0,005 = 0,055. \quad (8)$$

где  $R_{KH}$  – радиус комплексной нити, мм.

Соответственно диаметр  $d_{1C}$  (мм) армированной полиэфирной нити с учетом волокон оплетки первого слоя составит:

$$d_{1c} = 2r_{1c} = 2 \cdot 0,005 = 0,111. \quad (9)$$

Аналогичным образом можно рассчитать радиус ( $r_{2c}$ ) и диаметр ( $d_{2c}$ ) армированной полиэфирной нити, определенный по поверхности волокон второго слоя. Тогда радиус  $r_{2c}$  будет равен 0,058 мм, а диаметр  $d_{2c}$  составит 0,116 мм.

Исходя из предположения о слоистой структуре пряжи, рассчитаем силу нормального давления  $q$  в Н/мм на единицу длины одного волокна по формуле [6]

$$q_1 = \frac{p_1 \sin^2 \beta}{r}. \quad (10)$$

где  $p_1$  – сила натяжения волокна, Н;  $\beta$  – угол наклона волокна к оси пряжи, град;  $r$  – расстояние от оси волокна до оси комплексной нити, мм.

Величину силы натяжения волокна в  $H$  можно рассчитать по известной формуле

$$p_1 = \sigma \cdot S = \varepsilon \cdot ES, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – напряжение волокна, Н/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – удлинение волокна в долях;  $E$  – средний модуль продольной упругости волокна, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения волокна, м<sup>2</sup>.

Удлинение волокна в долях можно определить с помощью выражения [6]

$$\varepsilon = K_y \sqrt{1 + (\pi \cdot d_{APM} \cdot K)^2} - 1, \quad (12)$$

где  $K_y$  – коэффициент укрутки комплексной нити;  $d_{APM}$  – диаметр армированной полиэфирной нити, мм;  $K$  – крутка армированной полиэфирной нити, кр/м.

Допустим, что усадка при кручении армированной полиэфирной нити примерно равна усадке комплексной нити, применяемой в качестве стержневой.

Для определения коэффициента укрутки комплексной нити были проведены экспериментальные исследования на круткомере марки МТ-550, имеющемся в большинстве отечественных лабораторий. Согласно ГОСТ 6611.3–2003

расстояние между зажимами круткомера принималось равным 50 см. Число кручений и направление крутки (в данном случае крутка левая –  $S$ ) задавались на панели управления [7]. Укрутка комплексной нити определялась одновременно с определением числа кручений. При этом положение стрелки не фиксировалось в нулевом положении шкалы качающего зажима, а правый зажим вращался до тех пор, пока указатель стрелки левого зажима не достигал отклонения, соответствующего заданному числу кручений. Диапазон крутки комплексной нити составил от 200 до 1000 кр/м. По полученным значениям был построен график (рисунок 4) для определения укрутки комплексной нити в зависимости от её крутки. Крутка ( $K$ ), установленная на кольцевой прядильной машине при производстве армированных полиэфирных нитей, – 730 кр/м.

По результатам эксперимента была получена зависимость укрутки комплексной нити  $U$ , %, в зависимости от её крутки  $K$ , которая выглядит следующим образом (рисунок 4):

$$U = 0,0000062 K^2 - 0,0022 K + 0,2916. \quad (13)$$

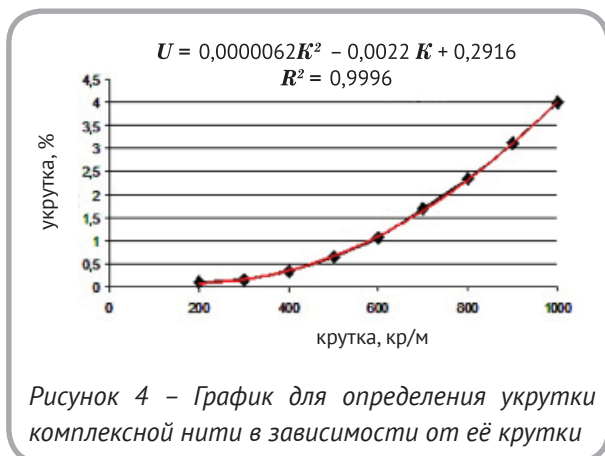
Укрутка комплексной нити при крутке армированной полиэфирной нити 730 кр/м, установленной на модернизированной кольцевой прядильной машине, составляет  $U(730) = 2$  %. Тогда  $K_y = 0,98$ .

Подставив вышерассчитанные значения коэффициента укрутки комплексной нити ( $K_y$ ), диаметра ( $d_{APM}$ ) и крутки ( $K$ ) армированной полиэфирной нити в формулу (12), получим, что удлинение полиэфирного волокна составит 0,019.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что максимальное удлинение полиэфирного волокна оплетки составило менее 2 %, что существенно ниже разрывного удлинения волокна, равного 24 %.

Площадь поперечного сечения полиэфирного волокна  $S_B$  (м<sup>2</sup>), исходя из его диаметра, можно определить по формуле

$$S_B = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4}. \quad (14)$$



Средний модуль продольной упругости волокна ( $E = 500 \times 10^7 \text{ Н/м}^2$ ) принят по справочным данным, приведенным для полиэфирного волокна в литературе [5, 8].

Подставив значения удлинения волокна ( $\epsilon$ ), среднего модуля продольной упругости ( $E$ ) и площади его поперечного сечения в формулу (11), получим, что натяжение полиэфирного волокна в оплетке составит 0,0074 Н.

Таким образом, установлено, что сила натяжения полиэфирного волокна в оплетке составляет 11,6 % от разрывной нагрузки полиэфирного волокна, равной 6,4 сН.

В пряже со слоистой структурой волокно может растягиваться или сжиматься (гофрироваться). Это объясняется тем, что периферийные волокна при растяжении стремятся переместиться к оси пряжи, а центральные волокна в процессе усадки пряжи при кручении гофрируются, их отдельные участки перемещаются на поверхность пряжи. В результате волокна располагаются по спиральям, с переменным шагом витков и переменным радиусом цилиндра, на который они наматываются. При этом угол подъема волокна изменяется в зависимости от положения, которое оно занимает [6]. Для определения угла наклона волокон оплетки относительно оси кручения армированной нити развернем в плоскости виток, образуемый при крутке, и получим треугольники, изображенные на рисунке 5.

Диаметр армированной нити можно рассматривать как цилиндр, заключенный в цилиндре. Для расчета развертки исходными данными будут диаметр внутреннего цилиндра, соответствующий диаметру сердечника  $d_{KH}$  то

есть комплексной нити, и диаметр внешнего цилиндра, соответствующий диаметру армированной полиэфирной нити ( $d_{APMH}$ ).

Определим диаметр армированной полиэфирной нити с учетом волокон оплетки первого ( $d_{C1} = d_{KH} + d_B$ ) и второго ( $d_{C2} = d_{KH} + 3d_B$ ) слоев.

Высота витка  $h$  (мм) в армированной нити может быть выражена как

$$h = 1000/K. \tag{15}$$

В зависимости от условий кручения, волокна получают различную деформацию, в результате которой каждое волокно, имевшее ранее длину  $L_0$ , меняет ее за счет усадки нити от крутки.

Длину полиэфирного волокна первого ( $L_{C1}$ ) и второго ( $L_{C2}$ ) слоя оплетки рассчитаем из развертки треугольников ACD и BCD, соответственно. Также из данных разверток треугольников можно рассчитать угол наклона волокон оплетки относительно оси кручения армированной нити  $\beta_1$  ( $\beta_2$ ) первого (второго) слоев соответственно к оси комплексной нити:

$$\sin \beta_{1(z)} = \frac{\pi \cdot d_{C1(z)}}{L_{C1(z)}}. \tag{16}$$

При формировании армированной нити комплексная нить испытывает силы нормального давления на единицу длины со стороны нижележащих и вышележащих слоев волокон. Рассчитаем силу нормального давления полиэфирных волокон оплетки на комплексную нить

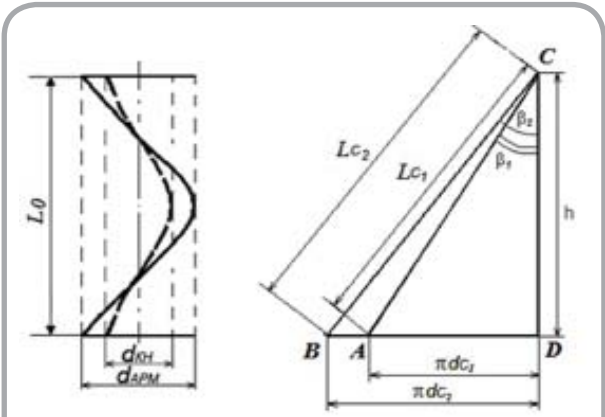


Рисунок 5 – Развертка на плоскости витка армированной нити

$q_{KH}$  в Н/мм:

$$q_{KH} = q_1 \cdot n_{min1} + q_2 \cdot n_{min2}, \quad (17)$$

где  $q_1$  – сила нормального давления на единицу длины одного волокна первого слоя, Н;  $q_2$  – сила нормального давления на единицу длины одного волокна второго слоя, Н

Сила нормального давления на единицу длины одного волокна первого (второго) слоя соответственно (Н/мм), составит:

$$q_{1(2)} = \frac{P_{1(2)} \sin^2 \beta_{1(2)}}{r_{1C(2C)}}. \quad (18)$$

Таким образом, сила нормального давления полиэфирных волокон оплетки на комплексную нить составит 0,466 Н/мм.

Сползание полиэфирных волокон оплетки вдоль стержневой комплексной нити возможно в том случае, если при огибании армированной нитью рабочих органов технологического оборудования на волокна действует сила трения  $F_1$ , большая, чем сила трения  $F_2$ , возникающая между комплексной нитью и волокнистым покрытием.

Силу трения  $F_2$  на 1 мм нити можно рассчитать по формуле

$$F_2 = q_{KH} \cdot f, \quad (19)$$

где  $f$  – коэффициент трения волокна о волокно (для полиэфирных волокон он составляет интервал 0,31–0,42), для расчетов принимаем  $f = 0,35$ .

Тогда сила трения  $F_2$ , возникающая между комплексной нитью и волокнистым покрытием, составит 0,163 Н.

Определим влияние крутки, сообщаемой армированной нити на кольцевой прядильной машине на степень закрепления волокнистого покрытия на поверхности комплексной нити. На рисунке 6 представлен график, характеризующий влияние крутки в прядении на силу трения  $F_2$ , возникающую между стержневой нитью и

волокнистым покрытием в армированных нитях различной структуры.

Анализируя представленные графики, можно отметить, что с повышением крутки в прядении увеличивается сила трения, возникающая между комплексной нитью линейной плотности 11,0 текс и волокнистым покрытием линейной плотности 5,7 текс в армированной полиэфирной нити линейной плотности 16,7 текс. В результате обеспечивается высокая компактность армированной нити и повышаются силы трения на поверхности соприкосновения волокон за счет более интенсивного огибания ими сердечника. Армированные полиэфирные нити линейной плотности 21,0 текс, выработанные с применением комплексных нитей 13,3 текс и оплетки линейной плотности 7,7 текс, также имеют тенденцию к увеличению силы трения с повышением крутки.

Проведенный расчет выполнен без учета неровноты волокнистого покрытия армированной нити по линейной плотности. Однако при формировании армированной нити данный фактор необходимо учитывать, так как неровнота оказывает влияние на линейную плотность нити, прочность закрепления и, как следствие, равномерность распределения полиэфирных волокон на стержневой нити.

На основе анализа гистограммы отклонения масс отрезков одиночных армированных нитей 16,7 текс для швейных ниток 35 ЛЛ, полученной

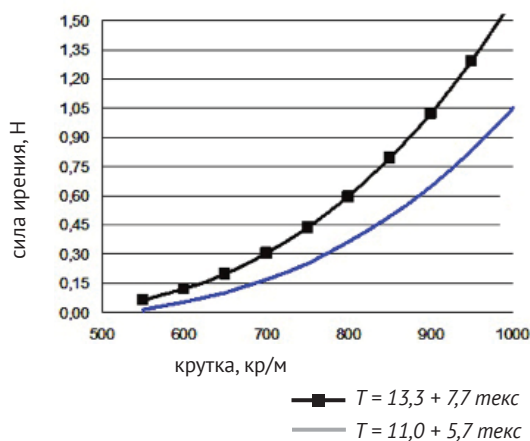


Рисунок 6 – Влияние крутки на силу трения, возникающую между комплексной нитью и волокнистым покрытием в армированных нитях различной структуры



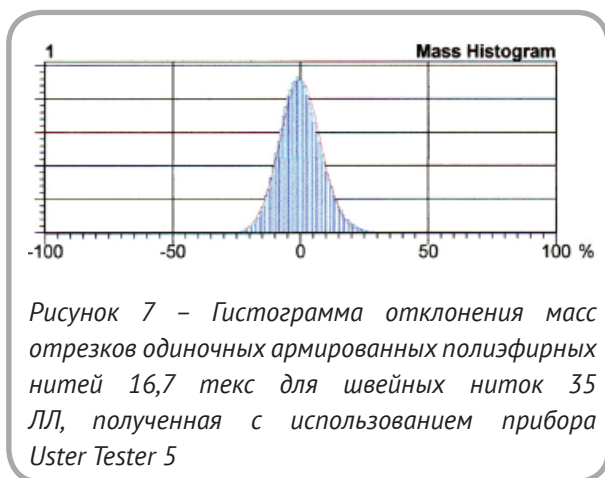
с использованием прибора Uster Tester 5, представленной на рисунке 7, установлено, что более чем в 99,8 % случаев массы отрезков нитей не отклоняются в меньшую сторону на величину, большую 20 %.

С учетом средней линейной плотности армированных полиэфирных нитей, равной 16,7 текс, максимальное отклонение линейной плотности волокнистого покрытия составляет 3,3 текс. Тогда минимальная линейная плотность покрытия составляет  $5,7 - 3,3 = 2,4$  текс.

Данная величина в 2,3 раза меньше значения, рассчитываемого без учета неровности волокнистого покрытия по линейной плотности (при  $T_B = 0,11$  текс). Однако количество подобных участков не превышает 0,2 %, что является допустимым для данного ассортимента нитей.

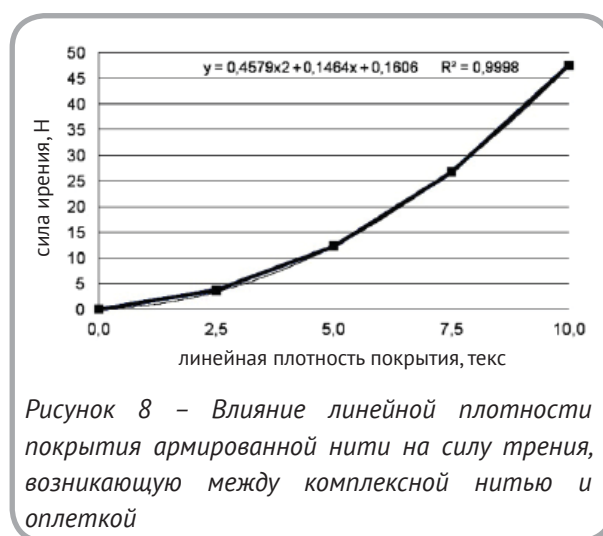
Влияние линейной плотности волокнистого покрытия в армированной полиэфирной нити на силу трения, возникающую между комплексной нитью и оплеткой, графически представлено на рисунке 8. Видно, что с повышением линейной плотности покрытия увеличивается сила сцепления полиэфирных волокон оплетки со стержневым компонентом, что обеспечивает более прочное ее закрепление.

С учетом фактической неровности волокнистого покрытия по линейной плотности одиночной армированной полиэфирной нити можно отметить следующее. При уменьшении линейной плотности оплетки армированной нити до минимального значения 2,4 текс происходит снижение силы трения между компонентами армированной нити в 5 раз по сравнению с силой трения, возникающей между стержневой нитью



и покрытием, средняя линейная плотность которого составляет 5,7 текс. В случае увеличения линейной плотности волокнистого покрытия армированной полиэфирной нити до 9,0 текс сила трения, возникающая между комплексной нитью и оплеткой, повышается примерно в 2,5 раза.

Таким образом, одним из направлений повышения прочности закрепления волокнистого покрытия на поверхности комплексной нити является снижение неровности оплетки по линейной плотности. Например, при снижении неровности в 1,2 раза линейная плотность волокнистого покрытия армированной полиэфирной нити повышается до 2,9 текс, а сила трения между ее компонентами возрастает в 1,4 раза.



## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлены факторы, влияющие на прочность сцепления волокнистого покрытия в армированной нити со стержневым компонентом: состав компонентов в армированной нити; количество и характер расположения волокон оплетки в покрытии сердечника; крутка; натяжение комплексной нити.

Экспериментально получена зависимость укрутки стержневого компонента армированной полиэфирной нити от крутки, сообщаемой нити на модернизированной кольцевой прядильной машине при ее формировании. Установлено, что укрутка комплексной нити при крутке в прядении равной 730 кр/м составляет 2 %.

Произведён расчет параметров армированной полиэфирной нити линейной плотности

16,7 текс для швейных ниток. Определена сила нормального давления полиэфирных волокон оплетки на стержневой компонент армированной полиэфирной нити и сила трения, возникающая между комплексной нитью и волокнистым покрытием армированной полиэфирной нити.

Исследовано влияние крутки в прядении и неровноты по линейной плотности волокнистого покрытия на степень закрепления волокнистого покрытия на поверхности армированной полиэфирной нити.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мигушов, И.И. (1980), *Механика текстильной нити и ткани*, Москва, 160 с.
2. Корицкий, К.И. (1983), *Технико-экономическая оценка и проектирование качества текстильных материалов*, Москва, 160 с.
3. Коган, А.Г. (1981), *Производство комбинированной пряжи и нити*, Москва, 143 с.
4. Чернавина, Л.М. (1992), Разработка структуры и технологии производства армированной крученой нити улучшенного качества, автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, С.-Петербург, ин-т текст. и легк. пром. им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 16 с.
5. Кукин, Г.Н., Соловьев, А.Н., Кобляков, А.И. (1989), *Текстильное материаловедение (волокна и нити)*, Москва, 352 с.
6. Рыклин, Д.Б. Коган, А.Г. (2002), *Производство многокомпонентных праж и комбинированных нитей*, Витебск, 215 с.
7. ГОСТ 6611.3–2003. Материалы текстильные. Нити. Методы определения числа кручений, укрутки и направления крутки – Введ. 2005 – 12 – 01.
8. Зарецкас, С.-Г. С. (1979), *Механические свойства нитей при кручении*, Москва, 184 с.

## REFERENCES

1. Megushow, I. . (1980), *Mehanika tekstil'noj niti i tkani* [Mechanics of a textile thread and fabric], Moscow, 160 p.
2. Koritski, K.I. (1983), *Tehniko-jekonomicheskaja ocenka i projektirovanie kachestva tekstil'nyh materialov* [Technical and economic assessment and design of quality of textile materials], Moscow, 160 p.
3. Kogan, A.G. (1981), *Proizvodstvo kombinirovannoj prjazhi i niti* [Production of core-spin yarn and filament]. Moscow, 143 p.
4. Chernavina, L.M. (1992), *Razrabotka struktury i tehnologij proizvodstva armirovannoj kruchenoj niti uluchshennogo kachestva* [Development of structure and the production technology of the reinforced twisted thread of the improved quality], *Institut tekstil'noj i legkoj promyshlennosti imeni S. M. Kirova – Institute for Textile and Light industry nam. S.M. Kirov*, 16 p.
5. Kukin, G.N., Soloviev, A.N., Koblyakov, A.I. (1989), *Tekstil'noe materialovedenie (volokna i niti)* [Textile material science (fiber and yarn)], Moscow, 352 p.
6. Ryklin, D.B., Kogan, A.G. (2002), *Manufacturing of blended and hybride yarns* [Proizvodstvo mnogokomponentnyh prjazh i kombinirovannyh nitej], Vitebsk, 215 p.

7. Standard 6611.3–2003. *Materialy tekstil'nye. Niti. Metody opredelenija chisla kruchenij, ukutki i napravlenija krutki* [Textile materials. Threads. Methods for determination of twisting number, contraction and twist direction], Vved. 2005 – 12 – 01.
8. Zaretskas, S.-G. S. (1979), *Mehanicheskie svojstva nitej pri kruchenii* [The mechanical properties of the threads in twisting], Moscow, 184 p.

*Статья поступила в редакцию 06.10.2014 г.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ $TiO_2$ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ СЕРЕБРА

И.С. Алексеев, И.А. Дорошенко

УДК 662.013.8:628.5

### РЕФЕРАТ

**ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ, ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ВАКУУМНОЕ МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ, ДИОКСИД ТИТАНА, ВЫДЕЛЕНИЕ СЕРЕБРА**

Целью работы является определение фотокаталитической активности стекол с нанесенными на них покрытием диоксида титана. Пленки на основе титана были осаждены на стеклянные пластины методом вакуумного магнетронного распыления. В данном методе распыление титана осуществляется в результате бомбардировки мишени ионами аргона в электрическом разряде, усиленном магнитным полем. Определение фотокаталитической активности проводили по методике выделения серебра из раствора. В результате экспериментальных исследований установлено, что на покрытии  $TiNO-TiO_2$  происходит активное выделение серебра в виде темного порошка, что позволило сделать вывод о фотокаталитической активности легированного диоксида титана при видимом свете с длиной волны  $\lambda > 390$  нм.

### ABSTRACT

**PHOTOCATALYTIC ACTIVITY, TITANIUM BASED FILMS, VACUUM MAGNETRON SPUTTERING, TITANIUM DIOXIDE, SILVER SELECTION**

Films on the basis of the titan were besieged on glass plates by a method of vacuum magnetron dispersion. In this method dispersion of the titan is carried out as a result of target bombing by argon ions in the electric discharge, the strengthened magnetic field. When drawing coverings different modes were applied. Determination of photocatalytic activity of glasses with put on them a covering of dioxide of the titan and a covering of dioxide of the titan alloyed by nitrogen carried out by a technique of allocation of silver from solution. As a result of pilot studies it is established that on a covering of  $TiNO-TiO_2$  there is an active allocation of silver in the form of dark powder that allowed to draw a conclusion on photocatalytic activity of the alloyed dioxide of the titan at visible light from a long wave  $\lambda > 390$ nm.

В последнее время получает все более широкое распространение использование нанопокровов и нанопорошков диоксида титана для фотокаталитического разложения вредных органических примесей в воде и воздухе, а также уничтожения широкой гаммы вредных бактерий и вирусов.

За последние годы много полупроводников с фотокаталитическими свойствами были полностью или частично исследованы включая  $TiO_2$  (3.2eV),  $SrTiO_3$  (3.4eV),  $Fe_2O_3$  (2.2eV),  $Cd$  (2.5eV),  $WO_3$  (2.8eV),  $ZnS$  (3.6eV),  $FeTiO_3$  (2.8eV),  $ZrO_2$  (5eV),  $V_2O_5$  (2.8eV),  $Nb_2O_5$  (3.4eV),  $SnO_2$  (3.5eV) так же как и многие другие [1–3].

Из всех известных полупроводников, обладающих фотокаталитической активностью, наиболее перспективным является диоксид титана  $TiO_2$ , так как  $TiO_2$  является наиболее распространенным веществом, не токсичным, с большой площадью удельной поверхности, низкой ценой, высокой химической и фотохимической стойкостью, высокой фотокаталитической активностью. Внедрение в решетку атомов других элементов позволяет повысить активность наноматериалов.

Актуальность темы состоит в том, что разработка новых наноматериалов, обладающих повышенной фотокаталитической активностью, по-

высит КПД систем фотокаталитической очистки.

Целью работы является определение влияния легирующих добавок на фотокаталитическую активность нанопокровов из диоксида титана ( $TiO_2$ ).

Для достижения поставленной цели были разработаны технологические параметры и режимы нанесения покрытий из диоксида титана.

Селективная обработка поверхности часто используется в фотохимических катализаторах  $TiO_2$  для усиления фотоактивности путем уменьшения рекомбинации электрон-дырочных пар и таким образом повышения количества переносимых зарядов.

Наиболее эффективными присадками для  $TiO_2$  являются благородные металлы и ионы переходных металлов.

Последние исследования показали, что возможно получить фотоактивные катализаторы, работающие в видимой части спектра при замещении кислорода в кристаллической решетке  $TiO_2$  неметаллами, такими как *N, C, S, P* и *B* [4-9].

Из всех рассмотренных неметаллов азот наиболее часто используется для легирования.

В работе пленки на основе титана были осаждены на стеклянные пластины методом вакуумного магнетронного распыления. Схематическое изображение экспериментальной установки и описание метода приведены в [10]. В данном методе распыление титана осуществляется в результате бомбардировки мишени ионами аргона в электрическом разряде, усиленном магнитным полем.

В эксперименте с последующей высокоэнергетической бомбардировкой напыленной пленки диоксида титана  $TiO_2$  ионами азота (ионное легирование) энергия потока составляла  $\sim 2$  кэВ при плотности потока  $\sim 10^{13}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ , толщины нанесенных слоев составляли  $\leq 100$  нм.

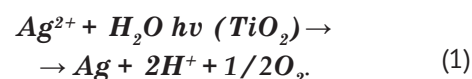
При дополнительной подаче в вакуумную камеру кислорода и/или азота (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па) образуются оксиды, нитриды или оксинитриды. Отношение парциальных давлений азот/кислород составляло 3/1. Наносились как монослои, так и двухслойные покрытия в различных сочетаниях.

При нанесении покрытий применялись следующие режимы:

- подача в вакуумную камеру кислорода с последующей подачей азота (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 3 мин (образец 1);
- подача в вакуумную камеру азота с последующей подачей кислорода (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 3 мин (образец 2);
- подача в вакуумную камеру азота и кислорода одновременно (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 3 мин (образец 3);
- подача в вакуумную камеру кислорода с последующей подачей ионов азота  $N_2^+$  (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 3 мин (образец 4);
- подача в вакуумную камеру кислорода (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 3 мин (образец 5);
- подача в вакуумную камеру кислорода (рабочее давление  $\sim 10^{-1}$  Па), время облучения 4 мин (образец 6).

В кювету помещали раствор нитрата серебра  $AgNO_3$  0,5 г/дм $^3$ . Расстояние ламп до раствора - 100 мм. Время облучения - 1,5 часа. Активность выделения серебра определялась визуально.

Фотокаталитическое разложение нитрата серебра на поверхности покрытия приводит к образованию в растворах наночастиц серебра черного цвета по уравнению 1 [11]:



Определение фотокаталитической активности стекол с нанесенными на них покрытием диоксида титана и покрытием диоксида титана, легированного азотом проводили в кюветах по методике описанной в статье [12]. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – УФ лампа; 2 – контрольная кювета; 3 – раствор азотнокислого серебра; 4 – кювета с образцом; 5 – покрытие; 6 – стекло

Процесс выделения серебра фиксировался на микроскопе МИ-1 с TV камерой. Рабочий объектив 5<sup>x</sup>, 10<sup>x</sup>, 20<sup>x</sup>, 50<sup>x</sup>, 100<sup>x</sup>. Окуляр 10<sup>x</sup>. Тубусный объектив 1<sup>x</sup>.

В контрольных опытах на стекле без покрытия выделение серебра не наблюдалось. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

- нет выделения серебра
- + выделение серебра
- ++ хорошее выделение серебра
- +++ активное выделение серебра

Выделение частиц серебра на стекле с фотокаталитическим покрытием показано на рисунках 2, 3.

Для проведения экспериментов были использованы нанопокрyтия, легированные азотом  $TiNO-TiO_2$ , и исследованы спектральные распределения излучения различных источников света с частотой волны  $\lambda > 390$  нм. Спектры лампы определялись спектрометром SOLAR S-100.

В связи с тем, что окислительно-восстановительный потенциал (редокс-потенциал) катионной металлической пары является более высоким, чем электрический потенциал запрещенной зоны полупроводника (диоксида титана), на поверхности нанопокрyтия выделяется металлическое серебро по уравнению (1).

В результате анализа влияния легирующих элементов на фотокаталитические свойства покрyтия из диоксида титана установлено, что легирование диоксида титана повышает фотокаталитическую активность покрyтий.

Установлено, что наиболее перспективным, в плане практической реализации и возможности реализации в процессе ионно – плазменного напыления является легирование диоксида титана атомами неметаллов (N).

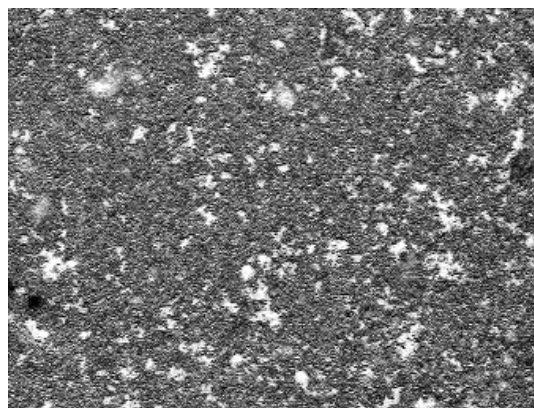


Рисунок 2 – Выделение частиц серебра на стекле с фотокаталитическим покрытием  $TiO_2$ . Рабочий объектив 20<sup>x</sup>. Увеличение 200 крат

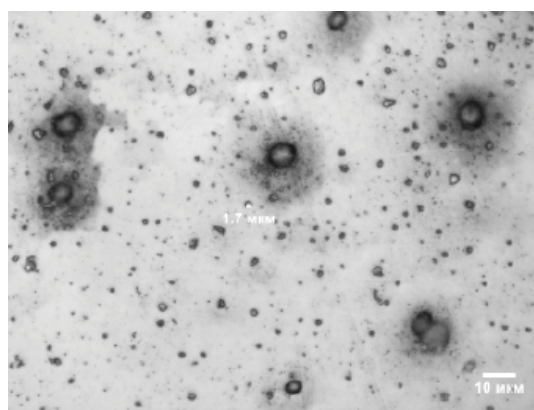


Рисунок 3 – Выделение частиц серебра на стекле с фотокаталитическим покрытием  $TiO_2$ . Рабочий объектив 100<sup>x</sup>. Увеличение 1000 крат

В процессе работы получены фотокаталитические покрyтия активные при видимом свете с длиной волны  $\lambda > 390$  нм. Установлено, что

Таблица 1 – Фотокаталитическая активность покрyтий

№ образца	Тип покрyтия	Толщина, нм	Освещение, УФ	Освещение, видимый свет
1	$TiO_2-TiNO$	20-40	+++	+
2	$TiNO-TiO_2$	20-40	++	++
3	$TiNO$	20-40	-	-
4	$TiO_2-N_2^+$	20-40	++	-
5	$TiO_2$	20-40	++	-
6	$TiO_2$	80-100	++	-

наибольшей активностью обладают покрытия  $TiNO-TiO_2$ .

Возможное практическое применение легированных покрытий на основе  $TiO_2$ :

1. Промышленные установки для очистки вредных выбросов предприятий, котельных, красильных цехов, мясокомбинатов и т. д.
2. Промышленные установки для очистки воздуха внутри предприятий, мест большого скопления людей (вокзалы, аэропорты, магазины, больницы, школы, детские сады и т. д.).
3. Промышленные установки для обеззараживания воздуха в сельском хозяйстве (птицефабрики, животноводческие комплексы).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований разработанные режимы позволили установить, что при подаче в вакуумную камеру азота с последующей подачей кислорода и образованием покрытия  $TiNO-TiO_2$  происходит активное выделение серебра в виде темного порошка, что позволяет сделать вывод о фотокаталитической активности легированного диоксида титана при видимом свете с длиной волны  $\lambda > 390$  нм.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

1. Brinker C.J., Scherer G. W. (1990), Sol-gel science. The physics and chemistry of sol-gel processing. London, Academic Press, 1990.
2. Sigmund P. (1987), Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, 1987.
3. Burda C., Lou Y., Chen X., Samia A. C. S., Stout J., Gole J. L. (2003), Enhanced nitrogen doping in  $TiO_2$  nanoparticles, Nano Letters, 2003, vol. 3, no. 8, pp. 1049–1051.
4. Mrowetz M., Balcerski W., Colussi A.J., Hoffmann M.R. (2004), Oxidative power of nitrogen-doped  $TiO_2$  photocatalysts under visible illumination, Journal of Physical Chemistry, 2004, vol. 108, no. 45, pp. 17269–17273.
5. Asahi R., Morikawa T., Ohwaki T., Aoki K., Taga Y. (2001), Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium ox-ides, Science, 2001, vol. 293, no. 5528, pp. 269–271.
6. Irie H., Watanabe Y., Hashimoto K., (2003) Nitrogen-concentration dependence on photocatalytic activity of  $TiO_2-xNx$  powders, Journal of Physical Chemistry B, 2003, vol. 107, no. 23, pp. 5483–5486.
7. Ihara T., Miyoshi M., Iriyama Y., Matsumoto O., Sugihara S., (2003), Visible-light-active titanium oxide photocatalyst realized by an oxygen-deficient structure and by nitrogen doping, Applied Catalysis B, 2003, vol. 42, no. 4, pp. 403–409,.
8. Yin S., Yamaki H., Komatsu M. (2003), Preparation of nitrogen-doped titania with high visible light induced photocatalytic activity by mechanochemical reaction of titania and hexamethylenetetramine, Journal of Materials Chemistry, 2003, vol. 13, no. 12, pp. 2996–3001.
9. Lin L., Lin W., Zhu Y., Zhao B., Xie Y. (2005), Phosphor-doped titania – a novel photocatalyst active in visible light, Chemistry Letters, 2005, vol. 34, no. 3, pp. 284–285.

10. Hao, W., Zheng, C., Wang T. (2002), Comparison of the photocatalytic activity of  $TiO_2$  powder with different particle size, Journal of Materials Science Letters, 2002, vol. 21, p-p. 1627-1629.
11. Shon, H., Phuntsho, S., Okour, F. (2008), Visible Light Responsive Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ), Korean Ind. Eng. Chem., 2008, Vol. 19, No. 1, p-p. 1-16.
12. Завадич, В.П., Егоров, В.Д., Алексеев, И.С. (2008), Специальные многофункциональные нанопокрyтия из диоксида титана, Композиционные материалы в промышленности, *Материалы Двадцать восьмой международной конференции*, Ялта, 2008, С.12-13  
Zavadich, V.P., Egorov, V.D., Alekseev, I.S. (2008), Special multifunctional nanocoating of titanium dioxide [Сpecial'nye mnogofunkcional'nye nanopokrytija iz dioksida titana], Kompozicionnye materialy v promyshlennosti, Materialy Dvadcat' vos'moj mezhdunarodnoj konferencii – Composite materials in industry, Proceedings of the Twenty eighth International Conference, Yalta, 2008, pp. 12-13

Статья поступила в редакцию 22.10.2014 г.



## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОКСИДНЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ И ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

П.А. Витязь, В.И. Жорник, С.А. Ковалева,  
Т.Л. Талако, Т.Ф. Григорьева

УДК 546.56+546.681+546.87

### РЕФЕРАТ

*МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ, МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ, МЕТАЛЛОКСИДНЫЕ ПОРОШКИ*

*В работе методами рентгеновской дифракции, электронной сканирующей, атомно-силовой и оптической микроскопии изучены структурно-фазовые превращения двойных металлических систем  $\text{Cu}-20\% \text{Me}$ ,  $\text{Fe}-20\% \text{Me}$ , где  $\text{Me}=\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$  в условиях механической активации и их влияние на формирование микроструктуры продуктов механохимического синтеза металл-оксидных систем  $\text{Cu}/\text{Me}-\text{CuO}$  и  $\text{Fe}/\text{Me}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Установлено, что использование наноструктурированных механокомпозитов  $\text{Cu}/\text{Me}$  и  $\text{Fe}/\text{Me}$  в качестве восстановителя в экзотермических реакциях взаимодействия с оксидами в ходе механической активации снижает интенсивность взаимодействия оксида и активного металла и приводит к управляемому формированию композиционных тройных металлоксидных частиц с ламинарной структурой и образованию сложных оксидов.*

### ABSTRACT

*MECHANOCHEMICAL REACTION, MECHANICAL ACTIVATION, METALLO OXYDE POWDERS*

*The oxidation-reduction reactions in the metal oxide systems of type  $\text{Me}-\text{CuO}$  and  $\text{Me}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  with active metals ( $\text{Me} = \text{Ti}, \text{Zr}$ ) can lead to thermal explosion. It was proposed to use mechanochemically obtained composite structures of active metals of type  $\text{Cu}/\text{Me}$  and  $\text{Fe}/\text{Me}$  as a reductant produced by the intensive mechanical activation. The results of investigation of effect of the structures of binary metallic nanostructured mechanocomposites precursors  $\text{Cu}/\text{Me}$ ,  $\text{Fe}/\text{Me}$  on the processes of structure formation of synthesis products of systems of type  $\text{Cu}/\text{Me}-\text{CuO}$  and  $\text{Fe}/\text{Me}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  are given. It was shown that using of the mechanocomposites  $\text{Cu}/\text{Me}$  and  $\text{Fe}/\text{Me}$  provides controlled flowing of the the redox reactions without causing thermal explosion forming the composite structure of the powders .*

### ВВЕДЕНИЕ

Дисперсно-упрочненные оксидами композиционные сплавы  $\text{Cu}-\text{CuO}$  и  $\text{Fe}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  являются перспективными конструкционными материалами для использования в машиностроении, ядерной энергетике, электротехнике. Известными способами получения материалов подобного класса являются термическое окисление, электроосаждение из растворов, внутреннее окисление, проведение окислительно-восстановительных реакций в инертной атмосфере в присутствии различных металлов-восстановителей, в том числе и при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) [1,2]. В последние годы развивается метод механохимического получения дисперсно-упрочненных оксидами порошков с последующим их компак-

тированием. Так, исследования процессов механического сплавления, проведенные авторами [3] в системах «оксид железа-металл ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ )», показали, что при деформационных воздействиях в процессе сдвига под давлением в наковальнях Бриджмена уже при комнатных температурах происходят окислительно-восстановительные реакции с образованием железа и вторичных оксидов железа нестехиометрического состава ( $\text{Fe}_{3-y}\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ ). Последующий отжиг завершает окислительно-восстановительные реакции.

Использование планетарной шаровой мельницы при обработке порошков металл-оксидных смесей приводит к превращениям аналогичным протекающим процессом сдвига под давлением. При этом отличительными особенностями меха-

нической активации (МА) в планетарной шаровой мельнице являются локальный разогрев, а также процессы измельчения зерен и субзерен частиц с деформационным перемешиванием. Это приводит к формированию высокоразвитых контактных поверхностей между исходными компонентами и высоких концентраций различного типа дефектов в приграничных областях, что и является причиной ускорения структурно-фазовых превращений в химически активных системах.

Ранее исследованные механохимические реакции восстановления оксидов [3–5] показали, что МА гематита в планетарной шаровой мельнице на воздухе приводит к образованию вторичного нестехеометричного магнетита. Добавление  $\alpha\text{-Fe}$  при МА в инертной атмосфере аргона способствует растворению  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в матрице  $\alpha\text{-Fe}$  и восстановлению  $\alpha\text{-Fe}$  с образованием вюстита  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$  с дефектными комплексами  $\text{Fe-O}$  в  $\alpha\text{-Fe}$ . При МА смеси гематита с титаном растворение оксида происходит более активно, чем в системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}$  с образованием твердых растворов  $\text{Fe-Ti}$ , а в результате реакции в системе с цирконием железо из гематита переходит в  $\alpha\text{-Fe}$  с образованием  $\text{ZrO}_2$  и интерметаллида  $\text{Fe}_2\text{Zr}$ . При этом авторы отмечают, что использование активных металлов циркония и титана в качестве восстановителей оксидов меди и железа приводят к протеканию реакций при МА на уровне теплового взрыва.

Для управления механизмом и кинетикой реакций можно использовать в качестве восстановителя механохимически полученные композиционные структуры активного металла в более инертной матрице.

Целью данной работы является изучение влияния структуры механокомпозиатов-прекурсоров  $\text{Cu/Me}$ ,  $\text{Fe/Me}$  ( $\text{Me}=\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ) на формирование металлоксидных композиций систем  $\text{Cu/Me-CuO}$  и  $\text{Fe/Me-Fe}_2\text{O}_3$  при интенсивной механической активации в планетарной шаровой мельнице.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе для получения механокомпозиатов-прекурсоров использовались порошки меди ПМС-1, карбонильного железа ПЖК, циркония М-41, титана ПТОМ. Механическая ак-

тивация проводилась в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице АГО-2 с водяным охлаждением в атмосфере аргона (объем барабана 250 см<sup>3</sup>, диаметр шаров 5 мм, загрузка 200 г, навеска обрабатываемого образца 10 г, скорость вращения барабанов вокруг общей оси ~1000 об/мин). Количественное соотношение компонент в механокомпозитах составляло 80 %  $\text{Fe}$ : 20 %  $\text{Me}$  и 80 %  $\text{Cu}$ : 20 %  $\text{Me}$ . Механическая активация проводилась с длительностью 4 и 20 мин.

На втором этапе выполнялась механическая активация смесей состава  $\text{CuO-Cu/Me}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe/Me}$  в соотношении 25:75 с длительностью 2 мин и 4 мин соответственно.

Изучение фазового состава порошковых композиций проводилось на дифрактометре D8 Advance в характеристическом излучении  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) с использованием базы данных рентгенографических стандартов ICDD PDF-2. Полуколичественный фазовый анализ состава полученного продукта проводился в ПО EVA с использованием корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio). Эта величина равна отношению интенсивностей 100 % линий  $I/I_c$  вещества и корунда ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в смеси, содержащей по 50 мас. % компонентов.

Расчет и уточнение микроструктурных параметров выполнялись по методу наименьших квадратов с проведением полнопрофильного разложения дифрактограмм по процедуре Pawley в ПО «TOPAS». Для описания формы пика использовалась функция псевдо-Фойгта. Расчет параметров микроструктуры проводился с учетом совместного вклада в уширение пиков размера кристаллитов ( $\langle L \rangle$ ) и микронапряжений ( $e_c$ ). Для расчета среднего размера кристаллитов применялась функция Лоренца, микронапряжений – функция Гаусса. Для исследования структуры полученных образцов использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) высокого разрешения MIRA\TESCAN с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Диаметр электронного зонда составлял 5,2 нм, область возбуждения – 100 нм. Получены изображения в прямых и обратно рассеянных электронах, что позволило исследовать распределение химических элементов по поверхности.

Исследования морфологических характе-

ристик и топографии поверхности получаемых продуктов проводились на атомно-силовом микроскопе NT-206 (Microtestmachines, г. Гомель) стандартными коммерческими V-образными зондами NSC11 (Mikromasch).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В системах **Cu-Me**, **Fe-Me** компоненты обладают высокой энергией химического взаимодействия:

$$\Delta H_{см Cu-Ti} \approx -17 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H_{см Cu-Zr} \approx -30 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{см Fe-Ti} \approx -15 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H_{см Fe-Zr} \approx -20 \text{ кДж/моль} [6,7].$$

И, согласно равновесным диаграммам состояния, в системах возможно образования ряда интерметаллических соединений [8]. Поэтому существует большая вероятность прохождения механохимических реакций с образованием интерметаллических соединений и твердых растворов в процессе формирования механокомпозитов за сравнительно короткий период обработки.

Рентгенофазовые исследования продуктов механохимического взаимодействия порошков **Fe-20 мас. % Me** и **Cu-20 мас. % Me** показали, что увеличение длительности МА с 4 мин до 20 мин приводит к существенному снижению интенсивности дифракционных отражений меди и железа и значительному их уширению, что обусловлено уменьшением их размеров кристаллитов (рисунки 1 – 4). В ходе механической активации в системах **Cu-Me** и **Fe-Me** дифракционные отражения титана и циркония становятся размытыми, а затем рефлексы циркония исчезают. При этом изменения параметров решетки (а) фаз меди и железа, несмотря на значительную разницу в атомных радиусах ( $R_{Cu} = 1,28 \text{ \AA}$ ,  $R_{Fe} = 1,26 \text{ \AA}$ ,  $R_{Zr} = 1,60 \text{ \AA}$ ,  $R_{Ti} = 1,47 \text{ \AA}$ ), не происходит, что достаточно обоснованно свидетельствует о возможном распределении циркония и титана по границам железа и меди [9].

По данным рентгенофазового анализа МА металлических систем с титаном (рисунки 1 – 3) в отличие от циркония (рисунки 2 – 4) сопровождается образованием незначительного количе-

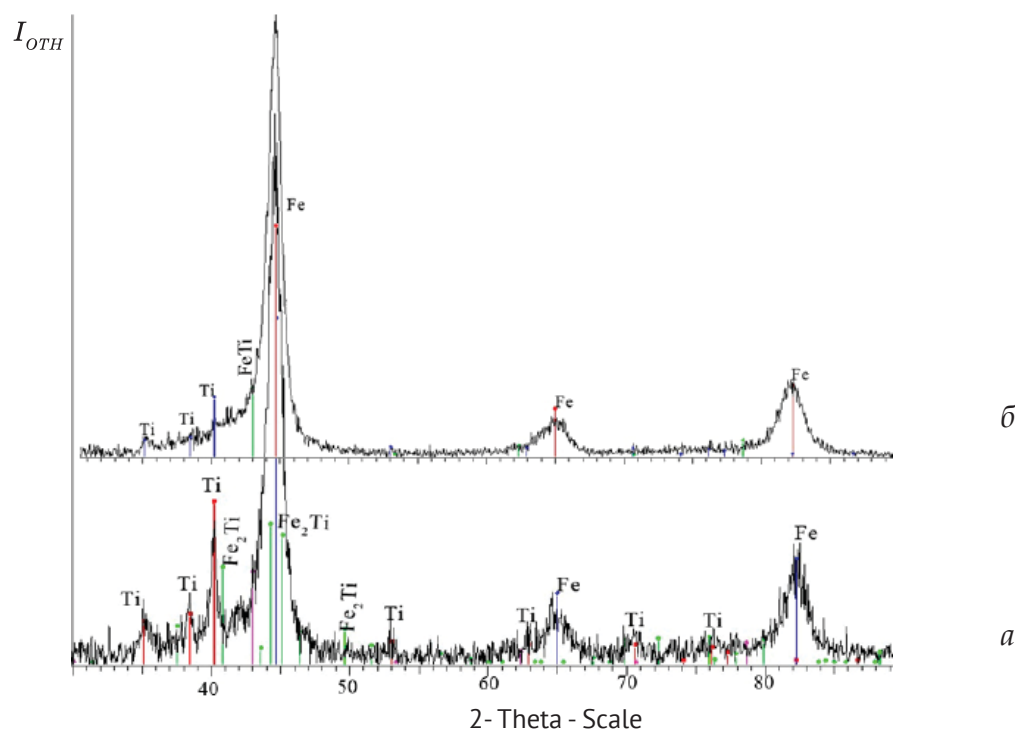


Рисунок 1 – Дифрактограммы порошков состава **Fe-20 % Ti** после механической активации в течение: а – 4 мин, б – 20 мин

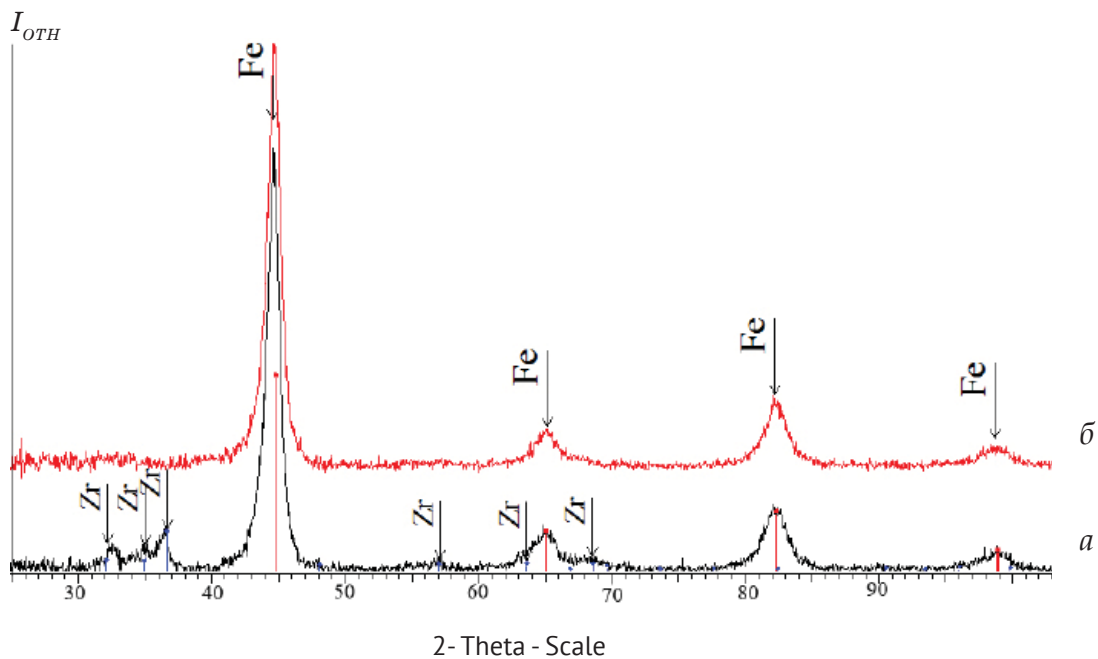


Рисунок 2 – Дифрактограммы порошков **Fe-20 % Zr**: а – время активации 4 мин, б – время активации 20 мин

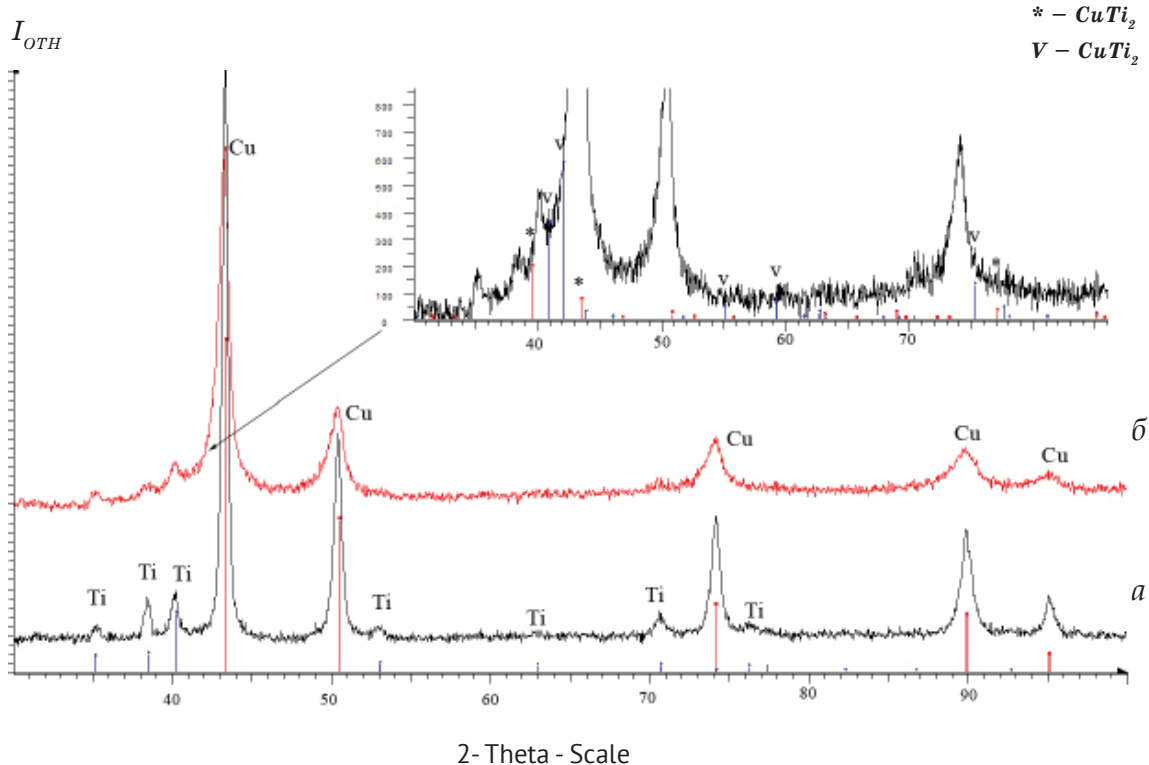
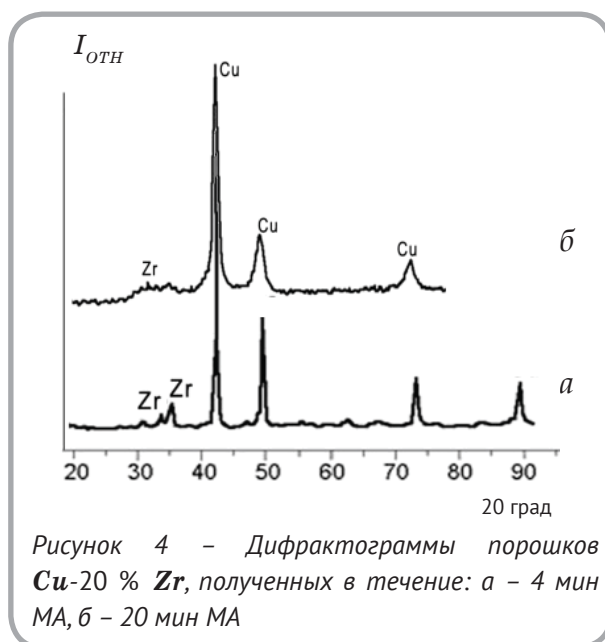


Рисунок 3 – Дифрактограммы порошков **Cu-20 %Ti**, полученных при МА в течение: а – 2 мин, б – 20 мин



ства интерметаллидов ***Fe<sub>2</sub>Ti***, ***FeTi*** или ***CuTi<sub>2</sub>***, ***CuTi***

По результатам рентгеноструктурного анализа (таблицы 1 – 2) увеличение длительности МА с 4 до 20 мин приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов железа (с 40–53 до 13–14 нм) и меди (с 45–50 до 10–15 нм), что сопровождается релаксацией микронапряжений. Незначительные изменения параметров решетки железа ( $a_{\text{эталон}} = 2,8664 \text{ \AA}$ ) и меди ( $a_{\text{эталон}} = 3,615 \text{ \AA}$ ) на начальной стадии МА предположительно обусловлены высоким уров-

нем микронапряжений, что может быть связано с формированием разупорядоченного поверхностного слоя и дефектного состояния частиц железа и меди. Можно полагать, что образования твердых растворов на основе меди и железа при механической активации в течение 20 мин не происходит.

Полученные данные электронной сканирующей микроскопии указывают на преимущественно гомогенное распределение наноразмерных компонентов (циркония и титана) в объеме металлических матриц (рисунок 5).

Размеры композиционных частиц ***Cu/Ti*** и ***Fe/Ti*** имеют широкий диапазон значений 10–60 и 5–25 мкм соответственно. При МА меди и железа с цирконием размер образующихся частиц механокомпозитов в 2 раза меньше относительно размеров частиц при МА с титаном. На ранней стадии МА (4 мин) происходит преимущественно измельчение частиц металлов. Увеличение длительности механической обработки приводит к образованию плоских плотных агрегатов с уменьшением среднего размера частиц в агрегатах с титаном с 500 до 300 нм (рисунок 6), а с цирконием менее 300 нм.

Таким образом, используемые в качестве металла-восстановителя биметаллические механокомпозиты представляют собой наноструктурированную матрицу железа или меди с преимущественно гомогенным распределением

Таблица 1 – Микроструктурные параметры ***Fe*** после МА с ***Ti***, ***Zr***, полученные рентгеноструктурным анализом (РСА)

Образец	<b><i>Fe/Ti</i></b> 4 мин МА	<b><i>Fe/Ti</i></b> 20 мин МА	<b><i>Fe/Zr</i></b> 4 мин МА	<b><i>Fe/Zr</i></b> 20 мин МА
<b>a</b> , $\text{\AA}$	2,869	2,870(8)	2,865(4)	2,866(0)
<b>&lt;L&gt;</b> , нм	53	14	40	13
<b><i>e<sub>G</sub></i></b>	1,5114	0,473	1,0922	1,0316

Таблица 2 – Микроструктурные параметры ***Cu*** после МА с ***Ti***, ***Zr***, полученные рентгеноструктурным анализом (РСА)

Образец	<b><i>Fe/Ti</i></b> 4 мин МА	<b><i>Fe/Ti</i></b> 20 мин МА	<b><i>Fe/Zr</i></b> 4 мин МА	<b><i>Fe/Zr</i></b> 20 мин МА
<b>a</b> , $\text{\AA}$	3,614	3,619	3,615(6)	3,617
<b>&lt;L&gt;</b> , нм	50	10	45	15
<b><i>e<sub>G</sub></i></b>	0,313	0,3344	0,5124	0,7854

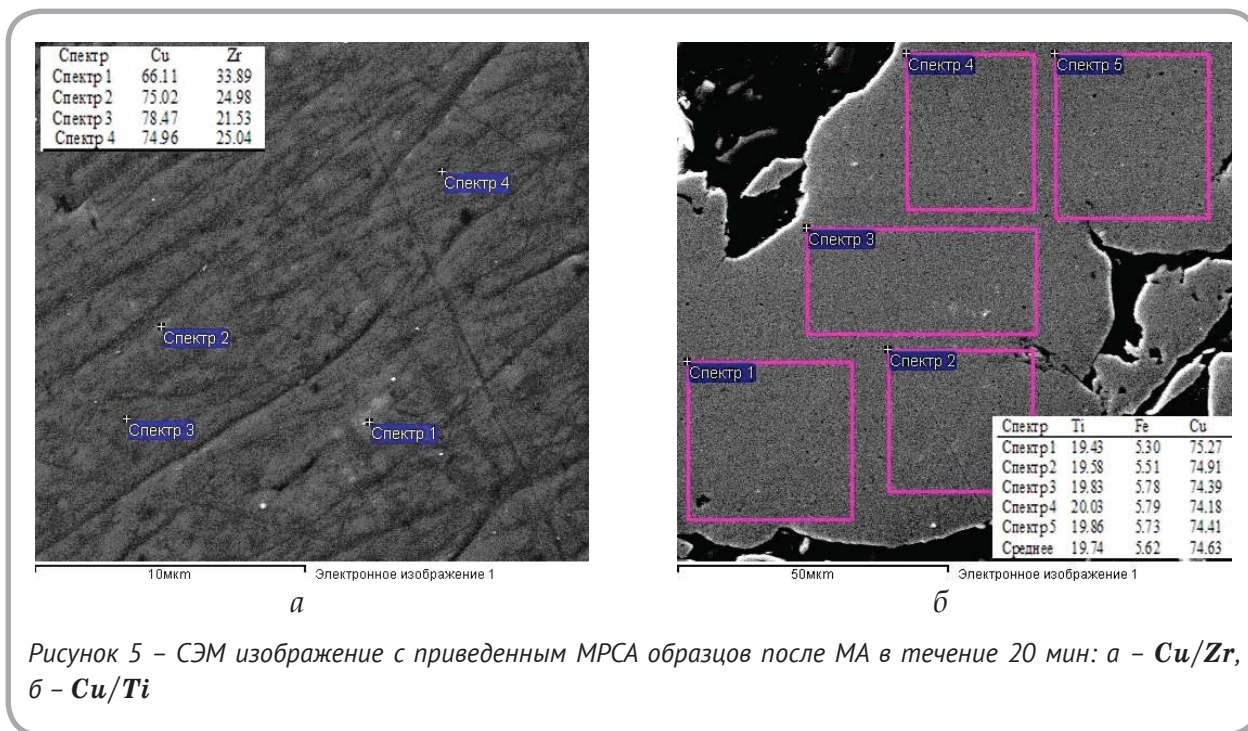


Рисунок 5 – СЭМ изображение с приведенным МРСА образцов после МА в течение 20 мин: а –  $Cu/Zr$ , б –  $Cu/Ti$

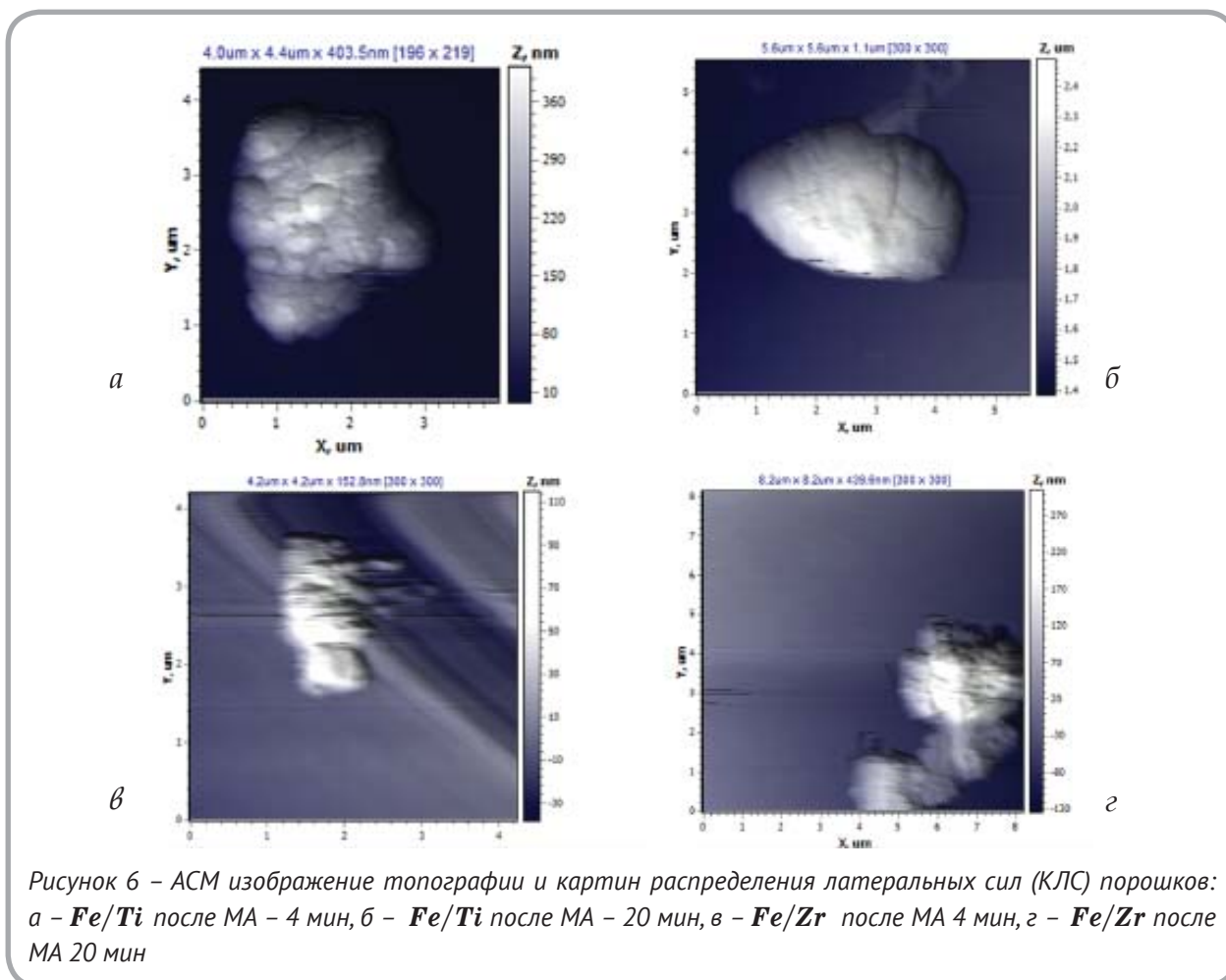
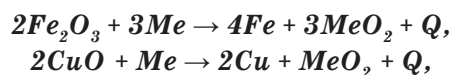


Рисунок 6 – АСМ изображение топографии и картин распределения латеральных сил (КЛС) порошков: а –  $Fe/Ti$  после МА – 4 мин, б –  $Fe/Ti$  после МА – 20 мин, в –  $Fe/Zr$  после МА 4 мин, г –  $Fe/Zr$  после МА 20 мин

легирующих элементов (*Ti*, *Zr*) в зернограничных областях меди и железа.

Протекание окислительно-восстановительных реакций в металл-оксидных смесях может быть записано следующим образом:



где *Q* – теплота, выделяемая в ходе реакции.

Применение механокомпозитов *Fe/Me* и *Cu/Me* в качестве восстановителей оксидов меди и железа приводит к возникновению конкурирующих окислительно-восстановительных реакций каждого компонента механокомпозита с оксидом.

По данным рентгенофазового анализа основными фазами механохимического синтеза в системе  $Fe_2O_3 + Fe/Ti$  являются железо  $\alpha$ -*Fe* (1m-3m), непрореагировавший оксид железа  $Fe_2O_3$  (гематит) (R-3c) и сложный оксид ульвошпинель  $Fe_2TiO_4$  (Fd-3m) (рисунок 7).

Дифрактограммы МА системы  $Fe_2O_3 + Fe/Ti$  характеризуются малой интенсивностью рефлексов, большим уширением и значительным асимметричным размытием «хвостов» пиков

в области углов  $2\theta$  от 36 до 45°. Асимметрия размытости «хвостов» пиков железа в сторону меньших углов связана с перераспределением кислорода в оксидах железа и образованием фаз вюстита  $Fe_{1-x}O$  (Pm-3m) и  $Fe_3Ti_3O$  (Fd-3m). Фаза диоксида титана рентгенографически не регистрируется. Увеличение длительности предварительной МА механокомпозитов-прекурсоров *Fe/Ti* до 20 мин не влияет на основной фазовый состав продуктов МА металл-оксидной смеси, однако применение прекурсора с большей длительностью МА способствует незначительному ускорению процессов взаимодействия при МА и уменьшению количества непрореагировавшего гематита в продукте (таблица 3).

При этом уменьшается и содержание фаз сложных оксидов и вюстита. Содержание фазы железа в смеси после МА увеличивается по отношению к исходной (60 %), а применение прекурсоров с большей длительностью МА приводит к увеличению содержания фазы железа.

По данным рентгеноструктурного анализа (таблица 4) в механохимически синтезированных металлоксидных композитах происходит измельчение кристаллитов гематита, при этом

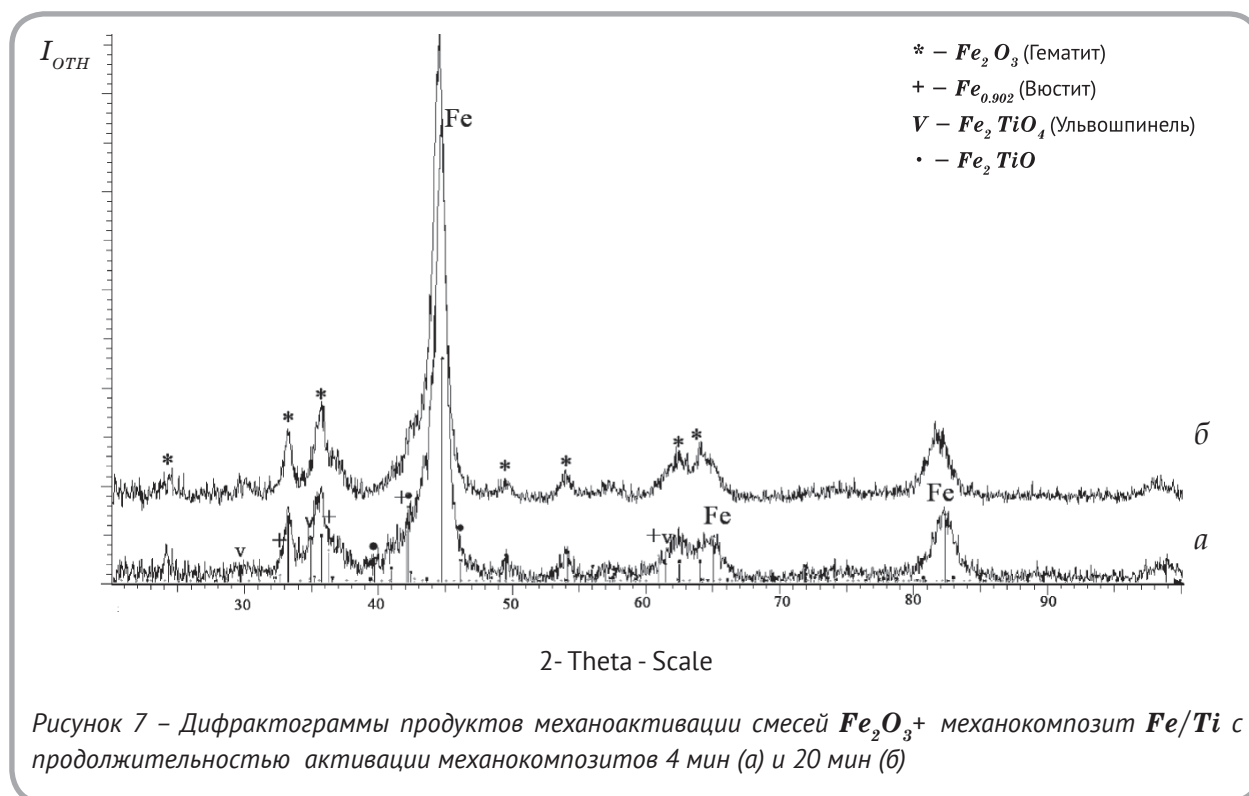


Рисунок 7 – Дифрактограммы продуктов механоактивации смесей  $Fe_2O_3 +$  механокомпозит *Fe/Ti* с продолжительностью активации механокомпозитов 4 мин (а) и 20 мин (б)

Таблица 3 – Фазовый и полуколичественный анализ композиционных порошков после МА смесей  $Fe_2O_3$ - $Fe/Ti$  для прекурсоров с различной длительностью МА

Длительность МА прекурсора $Fe/Ti$	Fe мас.%	$Fe_2O_3$ , мас.%	$Fe_2TiO_4$ мас.%	$FeO$ мас.%	$Fe_3Ti_3O$ мас.%
4 мин	65	10	15	5	5
20 мин	71	8	13	4	4

Таблица 4 – Рентгеноструктурные данные параметров тонкой структуры порошков  $Fe_2O_3$ - $Fe/Ti$  после МА

Наименование фазы	Длительность предварительной МА прекурсора $Fe/Ti$	
	4 мин	20 мин
$Fe$	$a = 2.871(8) \text{ \AA}$ $L = 16 \text{ нм}$	$a = 2.883(9) \text{ \AA}$ $L = 14 \text{ нм}$
$Fe_2O_3$ (гематит)	$L = 17 \text{ нм}$	$L = 11 \text{ нм}$

размер кристаллитов фазы  $\alpha$ -железа не изменяется и сохраняется на уровне состояния в прекурсор. Однако использование механокомпозиата  $Fe/Ti$  с 20 мин МА и при дальнейшей механической обработке в течение 4 мин в составе смеси с  $Fe_2O_3$  приводит к значительному увеличению параметра решетки железа. В данном случае можно говорить об образовании твердого раствора на основе железа. Растворимой фазой может быть как  $Ti$ , так и  $Fe_{1-x}O$  и  $TiO_2$ . При этом диоксид титана также может растворяться в вюстите [10].

Рентгенофазовый анализ продукта МА смеси  $Fe_2O_3$ + механокомпозит  $Fe/Zr$  показал, что основными фазами механохимического синтеза в течение 4 мин являются железо  $\alpha$ -Fe (Im-3m), оксид железа  $Fe_2O_3$  (гематит) (R-3c), вюстит  $Fe_{1-x}O$  и фазы оксида циркония  $ZrO$  (Fm-3m) и  $ZrO_2$  (tetragonal P42/nmc) (таблица 5) (рисунок 8). Сложных оксидов не обнаружено. Дифрактограммы имеют вид, характерный для порошков после интенсивной механической

обработки – это низкая интенсивность и значительное уширение рефлексов, асимметричная форма пиков. Профиль дифрактограммы в угловом диапазоне  $2\theta$  от 38 до 43° имеют схожий характер размытия хвостов от фаз железа и гематита для всех смесей на основе  $Fe_2O_3$ , что связано со структурными превращениями в оксидах железа.

При использовании прекурсоров  $Fe/Zr$  рентгенографически наблюдается образование оксида циркония  $ZrO$ . Увеличение длительности МА прекурсора  $Fe/Zr$  способствует уменьшению содержания этой фазы.

По данным рентгеноструктурного анализа параметры кристаллической решетки железа не изменяются ( $a_{Fe} = 2,868 (2) \text{ \AA}$ ), то есть образования твердых растворов не происходит. Размер кристаллитов гематита составляет ~ 7 нм. Размер кристаллитов железа уменьшается по отношению к прекурсор до 10 нм. При использовании механокомпозита  $Fe/Zr$ , механоактивированного в течение 20 мин, формируется диоксид

Таблица 5 – Фазовый и полуколичественный анализ композиционных порошков после МА смесей  $Fe_2O_3$ - $Fe/Zr$  для прекурсоров с различной длительностью МА

Длительность МА прекурсора $Fe/Ti$	Fe мас.%	$Fe_2O_3$ мас.%	$FeO$ мас.%	$ZrO$ мас.%	$ZrO_2$ мас.%
4 мин	64	7	6	8	15
20 мин	66	8	5	5	13



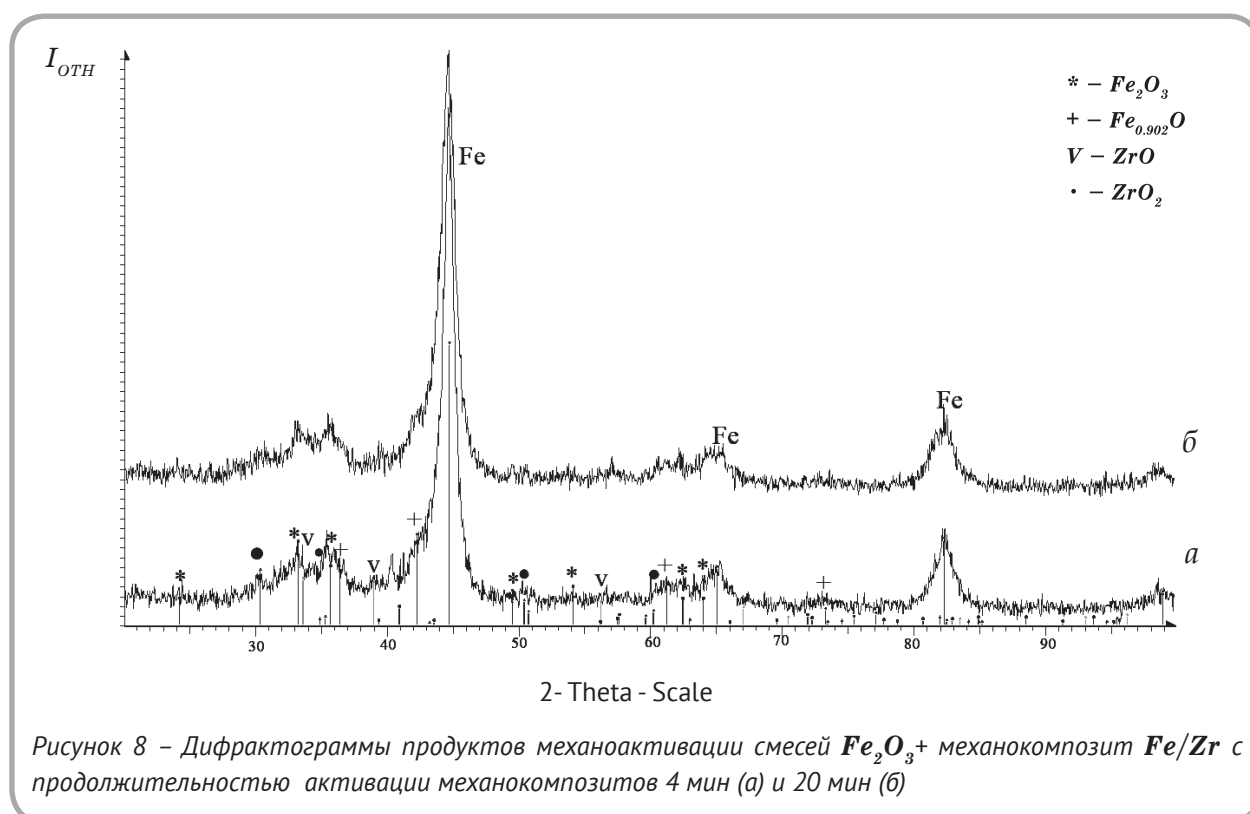


Рисунок 8 – Дифрактограммы продуктов механоактивации смесей  $Fe_2O_3$ + механокомпозит  $Fe/Zr$  с продолжительностью активации механокомпозитов 4 мин (а) и 20 мин (б)

циркония с более мелким размером кристаллитов ( $L = 4$  нм) по отношению к прекурсор, полученного с меньшей длительностью МА, что, вероятно, связано с более тонким распределением циркония в механокомпозите.

В металл-оксидных смесях  $Fe_2O_3-Fe/Zr$  и  $CuO-Cu/Zr$  при МА с длительностью 4 мин и 2 мин соответственно регистрируется образование  $ZrO_2$ , из чего можно предположить о частичном прохождении восстановительных реакций.

Рентгенографические исследования продукта МА смеси  $CuO-Cu/Zr$  в течение 2 мин показывают, что дифракционные отражения оксида меди  $CuO$  сохраняются во всех случаях, хотя и значительно уширяются (рисунок 9). В составе смеси наряду с фазами меди (67 %) и тенорита  $CuO$  (7 %) регистрируется образование фаз куприта  $Cu_2O$  (13 %) и оксидов циркония  $ZrO$  (4 %),  $ZrO_2$  (9 %). Сложных оксидов при МА смесей  $CuO + Cu/Zr$ , также как и с гематитом, рентгенографически не обнаружено.

Использование прекурсора с титаном при МА металл-оксидных смесей  $CuO+Cu/Ti$ , напротив, способствует формированию сложных оксидов  $Cu_3Ti_3O$  (7 %) и  $Cu_3TiO_4$  (13 %), при этом

также образуется куприт  $Cu_2O$  (16 %). Содержание меди (54 %) и тенорита (9 %) (рисунок 10).

С учетом того, что в исходной смеси количество меди составляло 60 %, можно предположить, что в процессе МА происходит восстановление тенорита до куприта  $Cu_2O$  (или термическое разложение с выделением кислорода  $CuO = 2Cu_2O+O_2$ ).

Как и случае прекурсора с цирконием, в смесях с механокомпозитами  $Cu/Ti$  происходит восстановление оксида меди  $CuO$  до  $Cu_2O$ , а окислительно-восстановительная реакция с титаном проходит через образование сложных оксидов, и при МА с длительностью 2 мин реакция восстановления меди не происходит до конца.

На рисунке 11 а, б приведены микроструктуры продуктов механохимического синтеза смесей  $CuO-Cu/Ti$  и  $Fe_2O_3-Fe/Ti$ . Композиционные гранулы  $CuO/Cu_2O/Cu/Cu_3Ti_3O/Cu_3TiO_4$   $Fe_2O_3/FeO/Fe/Fe_2TiO_4/Fe_3Ti_3O$  имеют широкий размерный диапазон 5–40 и 1–25 мкм соответственно и ламинарную структуру с чередованием слоев состава механокомпозит/оксид. В отличие от металл/оксидных порошков на основе меди при механоактивации смесей на основе железа не происходит гомо-



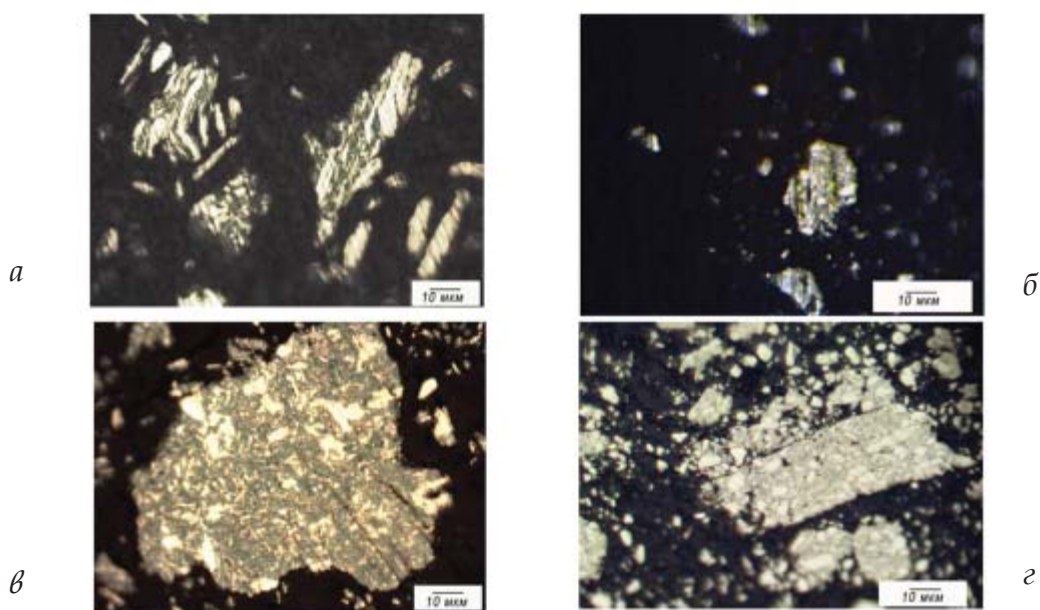


Рисунок 11 – Микроструктура композиционных гранул полученных при МА смесей состава: а –  $\text{CuO-Cu/Ti}$ , б –  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe/Ti}$ , в –  $\text{CuO-Cu/Zr}$ , г –  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe/Zr}$

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенных рентгенофазовых и рентгеноструктурных исследований механоактивированных смесей  $\text{Cu/Me-CuO}$  и  $\text{Fe/Me-Fe}_2\text{O}_3$  установлено, что при МА металл-оксидных смесей происходят фазовые превращения с образованием вторичных оксидов железа и меди. Механохимически могут быть получены композиты  $\text{Cu/Me}$  и  $\text{Fe/Me}$  с гомогенным распределением наноразмерных компонентов (циркония и титана) в объеме материала без существенного взаимодействия между ними в процессе механоактивации.

Использование механокомпозитов с цирконием в реакциях с оксидами меди и железа в условиях МА приводит к образованию меди, железа и оксидов циркония, а применение механокомпозитов с титаном при механической активации способствует формированию сложных оксидов. Увеличение длительности МА механокомпозитов-прекурсоров повышает растворимость в решетке железа и меди соединений на основе титана. Такое различие в кинетике фазообразования при МА предположительно можно связать с различной растворимостью циркония

и титана в матрицах железа и меди.

Образующиеся частицы имеют ламинарную структуру с чередованием слоев состава механокомпозит/оксид. Длительность предварительного активирования прекурсоров  $\text{Fe/Me}$  и  $\text{Cu/Me}$  мало влияет на структуру получаемых продуктов.

Применение механохимически полученных композитных порошков  $\text{Fe/Me}$  и  $\text{Cu/Me}$  в качестве восстановителя в реакциях с оксидами позволяет снизить активность металлов циркония и титана, что обеспечивает возможность управления кинетикой фазообразования в системах  $\text{Cu/Me-CuO}$  и  $\text{Fe/Me-Fe}_2\text{O}_3$  в условиях интенсивных деформационных воздействий. Полученные металлоксидные композиции могут быть использованы при контролируемом самораспространяющемся высокотемпературном синтезе.

Работа выполняется в рамках интеграционного проекта СО РАН № 19 и БРФФИ №X12CO-009.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ловшенко, Ф.Г., Ловшенко, Г.Ф. (2003), *Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий*: монография, Могилев, 215 с.
2. Лилеев, А.С., Викторов, В.Н., Старикова, А.С. (2008), Магнитотвердые материалы на основе наночастиц железа, *Известия РАН. Серия физическая (77)*, 2008, № 10, С. 1246-1428.
3. Шабашов, В.А., Литвинов, А.В., Мукусеев, А.Г. и др. (2004), Деформационно-индуцированные фазовые переходы в системе оксид-железа - металл, *ФММ (98)*, 2004, № 6, С.38-53.
4. Козлов, К.А., Шабашов, В.А., Литвинов, А.В., Сагарадзе, В.В. (2009), Фазовые превращения в системе «Гематит-металл» при механоактивации. *ФММ (107)*, 2009, № 4, С. 411-421.
5. Cuadrado-Laborde, C., Damonte, L.C., Mendoza-Zelis, L. (2001), Mechanochemical Reactions in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – M (M: Al, Ti), *Hyperfine Interact. (134)*, 2001, p. 131 – 140
6. Miedema, A.R., Boom, R., Boer, F.R. (1975), On the heat of formation of solid alloys. *J. Less-Common Met (41)*, 1975, № 2, p. 283-298.
7. Miedema, A.R. (1976), On the heat of formation of solid alloys (II). *J. Less-Common Met (46)*, 1976, № 1, p. 67-83.
8. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Ред. Н.П. Лякишев (1997). М., 1997, 1024 с.
9. Бутягин, П.Ю., Повстугар, И.В. (2004), О реакционной способности твердых тел в процессах механохимического синтеза, *Доклады академии наук (398)*, 2004, № 5, С. 635 – 638.

## REFERENCES

1. Lovshenko, F.G., Lovshenko, G.F. (2013), *Kompozicionnye nanostrukturnye mehanicheski legirovannye poroshki dlja gazotermicheskikh pokrytij* [Nanostructured composite mechanically alloyed powders for thermal coatings], Mogilev, 215 p.
2. Lileev, A.S., Viktorov, V.N., Starikova, A.S. (2008), Magnetic materials based on iron nanoparticles [Magnitotverdye materialy na osnove nanochastic zheleza]. *Proceedings of RAS. Physical Series (77)*. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja (77)*, 2008, № 10, p. 1246-1428.
3. Shabashov, V.A., Litvinov, A.V., Mukuseev, A.G. et.al. (2004), Deformation-induced phase transitions in the iron oxide - metal system [Deformacionno-inducirovannye fazovye perehody v sisteme oksid-zheleza - metall]. *FMM (98)*, 2004, № 6, p. 38-53
4. Kozlov, K.A., Shabashov, V.A., Litvinov, A.V., Sagaradze, V.V. (2009), Phase transformations in the "Hematite-Metal" system by mechanical activation [Fazovye prevrashhenija v sisteme «Gemaitit-metall» pri mehanoaktivacii]. *FMM (107)*, 2009, № 4, p. 411-421.
5. Cuadrado-Laborde, C., Damonte, L.C., Mendoza-Zelis, L. (2001), Mechanochemical Reactions in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – M (M: Al, Ti), *Hyperfine Interact. (134)*, 2001, p. 131 – 140
6. Miedema, A.R., Boom, R., Boer, F.R. (1975), On the heat of formation of solid alloys. *J. Less-Common Met (41)*, 1975, № 2, p. 283-298.
7. Miedema, A.R. (1976), On the heat of formation of solid alloys (II). *J. Less-Common Met (46)*, 1976, № 1, p. 67-83.

10. Лыкасов, А.А. (2002), Система **Fe–Ti–O**. Твердый раствор **TiO<sub>2</sub>** в вюстите. Физическая химия и технология неорганических материалов. *Известия Челябинского научного центра*, 2002, Вып. 2 (15). с.32-35.
8. Diagrams of binary metallic systems: A Handbook [Diagrammy sostojanija dvojnyh metallicheskih sistem: Spravochnik]. Ed. N.P. Lyakishev (1997). M.: Mashinostroenie – M: Engineering (2), 1997, 1024 p.
9. Butyagin, P.Y., Povstugar, I.V. (2004), On the reactivity of solids in the process of mechanochemical synthesis [O reakcionnoj sposobnosti tverdyh tel v processah mehanohimicheskogo sinteza]. *Doklady akademii nauk (398) – Reports of Academy of Sciences (398)*, 2004, № 5, p. 635 - 638.
10. Lykasov, A.A. (2002), The system **Fe–Ti–O**. Solid solution of **TiO<sub>2</sub>** in wustite [Sistema **Fe–Ti–O**. Tverdyj rastvor **TiO<sub>2</sub>** v vjustite]. *Fizicheskaja himija i tehnologija neorganicheskikh materialov. Izvestija Cheljabinskogo nauchnogo centra - Physical chemistry and technology of inorganic materials. Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center*, 2002, vol. 2 (15), p. 32-35.

Статья поступила в редакцию 11. 08. 2014 г.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ АМОРФНОЙ ФАЗЫ

Г.Г. Горанский, Б.Б. Хина, В.И. Жорник, А.И. Поболь

УДК 536.425:538.91

### РЕФЕРАТ

*АМОРФНАЯ ФАЗА, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ТЕРМОДИНАМИКА ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ, ЭНЕРГИЯ ГИББСА, ЭНТАЛЬПИЯ*

*Объект исследования – аморфные сплавы, выступающие в качестве прекурсоров для получения нано- и субмикроструктурных материалов и покрытий путем контролируемого нагрева, в процессе которого протекает кристаллизация аморфной фазы. Предмет исследования – термодинамика процессов зародышеобразования при кристаллизации многокомпонентных аморфных систем с оценкой энергии активации процесса и его экзотермического эффекта.*

*Цель работы – разработка теоретических методов оценки устойчивости аморфных сплавов к кристаллизации и расчета выделяющейся теплоты превращения, включающих построение физической модели процесса кристаллизации многокомпонентных аморфных систем, позволяющей осуществлять количественный расчет изменения энергии Гиббса и энтальпии.*

*В статье рассмотрены термодинамические аспекты зародышеобразования при кристаллизации аморфных сплавов и предложена основанная на методах CALPHAD термодинамическая модель для теоретической оценки энергии активации превращения многокомпонентной аморфной фазы в кристаллические, а также определения выделяющейся при этом теплоты. Опираясь на запасы энтальпии неравновесного фазового перехода как новым технологическим параметром, можно повышать энергоэффективность процессов консолидации аморфных дисперсий в макрообъемы, управлять их строением и свойствами, формируя субмикроскопические и нанокристаллические структуры, и создавать различные типы многофункциональных покрытий и изделий.*

### ABSTRACT

*AMORPHOUS PHASE, CRYSTALLIZATION, THERMODYNAMICS OF NUCLEATION, GIBBS ENERGY, ENTHALPY*

*The thermodynamic model based on CALPHAD methods for the theoretical evaluation of the activation energy of the conversion of a multicomponent amorphous phase in submicron and nanocrystalline phases and for calculation of heat released at the same time is proposed. It is shown that the enthalpy of nonequilibrium phase transition stored in an amorphous powders can be considered as a new technological parameter of the crystallization process of the amorphous phase, which can be used for control of structure and properties of crystallizing materials, for improve of energy efficiency of consolidation of amorphous dispersions into macro volume as well as for formation of different types of multifunctional coatings and products.*

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективным направлением повышения функциональных свойств материалов и покрытий является формирование в них аморфной, квазикристаллической, нано- или субмикрорекристаллической структуры. Аморфные сплавы (АС) обычно получают путем закалки металлических расплавов со скоростью охлаждения  $\sim 10^4 - 10^7$  К/с [1]. Альтернативным способом получения аморфных металлических материалов, не требующим применения высоких температур и термического оборудования, является механическое легирование (МЛ) – длительный интенсивный размол смеси металлических порошков или смеси металлов с неметаллическим компонентами в энергонапряженной шаровой мельнице (вибрационной, планетарной и др.) или атриторе [2]. Аморфные сплавы обладают рядом уникальных свойств, включая физические (магнитные), химические (высокая коррозионная стойкость) и механические (износостойкость, низкий коэффициент трения, высокие упругие свойства и др.) [3]. Особенностью таких материалов являются низкие значения коэффициента диффузии [4], что обуславливает стабильность свойств в температурной области существования АС. К числу недостатков АС относится их хрупкость и низкая термическая стабильность – при нагреве до определенной температуры они переходят в кристаллическое состояние. В связи с этим для определения стабильности многокомпонентных АС и уточнения условий их использования важно оценить термодинамические характеристики аморфного состояния.

Перспективным является использование АС как прекурсоров для получения нано- и субмикрорекристаллических материалов и покрытий путем контролируемого нагрева, при котором происходит кристаллизация АС [5, 6]. При этом возможно получение полностью нанокристаллической структуры, либо композитной – наноразмерные зерна кристаллической фазы в аморфной матрице. Так, при кристаллизации аморфного алюминиевого сплава системы *Al-Y-Fe* при печном нагреве (245 °С, 10 мин) получен *in situ* композитный материал, содержащий нанокристаллические включения размером 20 нм (до 30 % по объему) в аморфной матрице [5].

Предметом интенсивных исследований является получение объемных нано- и субмикрорекристаллических материалов с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД), например, равноканально-угловое (РКУ) прессование [7], винтовая экструзия [8], обработка в наковальнях Бриджмена и др. Эти процессы имеют ограниченное применение, прежде всего из-за проблем с термической стабильностью структуры. В этой связи важно подчеркнуть, что границы зерен кристаллизационного происхождения, присутствующие в полностью закристаллизованных АС, являются более устойчивыми к нагреву (то есть к росту зерен в процессе рекристаллизации), чем границы деформационного происхождения (фактически – дислокационные стенки, то есть границы субзерен) в сплавах, подвергнутых ИПД [9]. В этом состоит одно из возможных преимуществ использования закристаллизованных АС: высокая стабильность микроструктуры и, следовательно, механических свойств при нагреве.

Аморфные металлические сплавы являются термодинамически неравновесными – они содержат избыточную, или «запасенную» энергию (точнее, энтальпию), которая выделяется при неравновесном фазовом переходе «аморфная фаза → кристалл». Однако в вышеупомянутых процессах получения композиционных аморфно-нанокристаллических или полностью нано- или субмикрорекристаллических материалов это тепловыделение обычно не используется и никак не влияет на конечный результат.

Для получения износостойких покрытий на деталях машин широко применяют газопламенное напыление порошков самофлюсующихся сплавов на основе никеля. Нагрев порошковых частиц происходит во время их пролета в газопламенной струе, при этом часто их температура, достигаемая к моменту столкновения с основой, является недостаточной для формирования качественного покрытия. В то же время существует потенциальная возможность использовать аморфизированные порошковые сплавы для получения качественных нано- или субмикрорекристаллических износостойких материалов и покрытий, утилизируя при этом запасенную в аморфизированных порошках энтальпию неравновесного фазового перехода для повыше-

ния температуры формирования материала или покрытия. При этом повышается энергоэффективность процесса и открывается перспектива управления структурой и свойствами получаемых покрытий.

Спекание изделий из аморфизированных порошковых композиций может протекать более интенсивно с формированием мелкодисперсной зеренной структуры, обуславливающей их повышенные физико-механические и функциональные свойства.

На основании сказанного можно констатировать, что «запасенная» энергия аморфной фазы является дополнительным технологическим параметром, управляя которым можно целенаправленно изменять структурно-фазовое состояние и свойства консолидированного порошкового материала или покрытия.

Цель настоящей работы состояла в разработке теоретических методов оценки устойчивости аморфных сплавов к кристаллизации и расчета выделяющейся теплоты превращения, в построении физической модели процесса кристаллизации многокомпонентных аморфных систем, позволяющей осуществлять количественный расчет изменения энергии Гиббса и энтальпии, то есть определять энергию активации процесса и его экзотермический эффект.

#### АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Теоретические исследования процесса кристаллизации аморфной фазы обусловлены двумя обстоятельствами.

1. При сильном переохлаждении металлического расплава ниже температуры равновесной кристаллизации  $T_m$  его вязкость увеличивается, и при некоторой температуре  $T_g$  происходит стеклование, проявляющееся в катастрофическом возрастании вязкости. При этом тепловыделения не происходит (рис. 1), и АС часто рассматривают как застывшую жидкость. Однако при нагреве АС до некоторой температуры ниже  $T_g$  происходит его кристаллизация. Следует отметить, что теплота, выделяющаяся при кристаллизации аморфного сплава  $\Delta H_{a-cr}$  (при  $T < T_g$ ), отличается от теплоты плавления/кристаллизации  $\Delta H_m$  (при  $T_m$ ). Это связано с различием теплоемкости металлического стекла и жидкого металла того

же состава, что проявляется в разном наклоне линии энтальпии для сильно переохлажденного расплава в интервалах температуры выше и ниже  $T_g$  (рис. 1). В связи с этим необходимо определить теплоту  $\Delta H_{a-cr}$ , выделяющуюся при кристаллизации АС.

2. Энергия активации кристаллизации аморфного сплава  $E_c$ , которую обычно определяют путем обработки данных дифференциального термического анализа по методу Киссинджера (Kissinger) [11], для многих металлических стекол оказывается очень большой, и объяснение этому в литературе отсутствует. Например, для АС состава  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$  получено значение  $E_c = 400$  кДж/моль [12], то есть около 4 эВ. Для аморфных сплавов  $Zr_{1-x}Cu_x$  величина  $E_c$  составляет 3,87–5,37 эВ в интервале составов  $x = 0,45-0,62$  [13]. В [14] приведены значения энергии активации кристаллизации для следующих металлических стекол:  $Co_{33}Zr_{67} - E_c = 4,0$  эВ,  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9 - E_c = 3,7$  эВ,  $Fe_{90}Zr_{10} - E_c = 3,4-3,6$  эВ.

Энергия активации любого многостадийного процесса (химической реакции или фазового превращения) измеренная экспериментально, относится к лимитирующей (наиболее медленной) стадии. При рассмотрении изотермических фазовых превращений в бинарных или многокомпонентных сплавах обычно полагают, что при росте частиц новой фазы процесс контро-



Рисунок 4 – Схема изменения энтальпии при получении АС закалкой расплава и при кристаллизации аморфной фазы в условиях нагрева до температур ниже  $T_g$  (по материалам [10])



лируется твердофазной диффузией в матрице, то есть зародышеобразование не является лимитирующей стадией [15]. Однако в АС типичное значение энергии активации диффузии  $E_d = 1-3 \text{ эВ} \approx 100-300 \text{ кДж/моль}$  [4], что ниже экспериментально измеренных значений энергии активации их кристаллизации  $E_c$ . Следовательно, лимитирующей стадией кристаллизации АС является не диффузия в аморфной матрице, а образование зародышей новых (кристаллических) фаз. Таким образом, необходимо теоретически объяснить наличие высокой энергии активации рассматриваемого процесса.

Согласно [16], скорость нуклеации  $I$  (поток зародышей для гомогенного и гетерогенного механизма зародышеобразования), определяется в виде

$$I = k_z N_o \exp\left(-\frac{G^*}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где  $k$  – частота присоединения атомов к критическому зародышу,  $z$  – фактор Зельдовича, описывающий отклонение распределение зародышей по размеру от равновесного,  $N_o$  – число мест в единице объема, где возможна нуклеация,  $G^*$  – энергия Гиббса образования критического зародыша, имеющая смысл энергии активации,  $k_B$  – константа Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Фактор Зельдовича определяется как

$$z = \sqrt{\frac{G^*}{3\pi k_B T n_*^2}},$$

где  $n_*$  – число атомов в критическом зародыше.

В формуле (1) важнейшим параметром, имеющим смысл энергии активации кристаллизации АС (выше обозначенная как  $E_c$ ), является  $G^*$ . Поскольку в АС отсутствуют границы зерен и другие двумерные дефекты, которые могут служить местами для гетерогенной нуклеации зерен новых фаз, при кристаллизации АС имеет место гомогенное зародышеобразование.

Рассмотрим образование равноосных кристаллитов новой фазы, и для простоты (как в [16]) примем, что они имеют сферическую форму. Определим энергию Гиббса  $G$  образования зародыша радиуса  $r$  с учетом энергии возни-

кающей границы между аморфной матрицей и кристаллитом новой фазы:

$$G(r) = -\frac{4\pi r^3}{3} \frac{\Delta G}{\omega} + 4\pi r^2 \gamma, \quad (2)$$

где  $\Delta G$  – изменение энергии Гиббса при фазовом переходе в расчете на 1 моль,  $\omega$  – мольный объем кристаллической фазы,  $\gamma$  – энергия границы «аморфная фаза – кристалл» на единицу площади.

В формуле (2) первое слагаемое в правой части описывает объемное изменение энергии, а второй член – вклад поверхностной энергии. Знак «-» при первом слагаемом означает снижение энергии Гиббса при фазовом переходе, а знак «+» при втором члене – ее увеличение из-за возникновения отсутствующей ранее поверхности раздела фаз.

Зародыш радиуса  $r$  становится критическим, то есть может расти, когда выполняется условие  $\partial G / \partial r = 0$ ; это соответствует критическому радиусу  $r^*$ . Тогда из (2) получаем

$$\frac{\partial G}{\partial r} = -\frac{4\pi r^2 \Delta G}{\omega} + 8\pi r \gamma. \quad (3)$$

Из формулы (3) при  $\partial G / \partial r = 0$  определим размер критического зародыша  $r^*$ :

$$r^* = 2\gamma\omega / \Delta G. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим энергию образования критического зародыша  $G^* = G(r^*)$ , то есть энергию активации зародышеобразования:

$$G^* = \frac{16\pi}{3} \frac{\gamma^3 \omega^2}{(\Delta G)^2}. \quad (5)$$

Для расчетов и сравнения с экспериментальными данными по  $G^*$  необходимо определить изменение энергии Гиббса при неравновесном фазовом превращении аморфной фазы в кристаллическую  $\Delta G$  и энергию границы возникающих кристаллов с аморфной фазой  $\gamma$ .

Данные по энергии границы «кристалл – аморфная фаза» в литературе отсутствуют. Од-

нако известны значения  $\gamma$  для границы «кристалл – расплав» для ряда чистых металлов и некоторых бинарных сплавов при точке плавления  $T_m$ , а также измеренные и рассчитанные с использованием теории гомогенной нуклеации значения энергии границы «твердый зародыш – расплав» ( $\gamma_{sm}$ ) для чистых металлов, переохлажденных ниже точки равновесной кристаллизации на величину  $\Delta T$  [17]. Например, для **Fe** при  $\Delta T = 295$  К,  $\gamma_{sm} = 0,204$  Дж/м<sup>2</sup>, для **Ni** при  $\Delta T = 319$  К,  $\gamma_{sm} = 0,255$  Дж/м<sup>2</sup>, для **Co** при  $\Delta T = 330$  К,  $\gamma_{sm} = 0,234$  Дж/м<sup>2</sup> [17]. Существуют формулы для расчета этих величин при  $T_m$  [18], которые для чистых металлов дают хорошее согласование с экспериментом. В работе [19] приведены оценочные формулы и выполнен расчет для энергии границы «чистый металл (**Ag**, **Cu**, **Ni**) – переохлажденный расплав» в зависимости от температуры. Существует простая полуэмпирическая формула для оценки энергии границы «кристалл – расплав» в условиях переохлаждения в зависимости от температуры [18]

$$\gamma = 0,211a_1\Delta H_m / \omega + 0,52 \cdot 10^{-7}T / \omega^{2/3}, \quad (6)$$

где  $a_1$  – средний диаметр атома в расплаве,  $\Delta H_m$  – энтальпия плавления,  $\omega$  – мольный объем кристаллической фазы.

Средний диаметр атома, входящий в формулу (6), можно определить исходя из мольного объема расплава  $\omega_m$  [20]:

$$a_1 = (\omega_m / N_A)^{1/3} = [\mu_m / (\rho_m N_A)]^{1/3}, \quad (7)$$

где  $\mu_m$  – молекулярная масса расплава,  $\rho_m$  – его плотность,  $N_A$  – число Авогадро.

Поскольку аморфный металл часто рассматривают как переохлажденный расплав, в первом приближении можно использовать эти данные и подходы для оценки энергии границы «кристалл – аморфная фаза»  $\gamma$ , экстраполируя их на более низкие температуры.

Необходимо дать теоретическую оценку изменения энергии Гиббса  $\Delta G$ , входящей в формулу (5), и энтальпии  $\Delta H$  превращения АС → кристалл. Последняя величина позволит оценить теплоту, выделяющуюся при кристаллизации ме-

таллических стекол.

Опыт показывает, что указанные величины лучше всего оценивать на основе термодинамических данных для различных фаз (соединений и твердых растворов), используемых для расчета равновесных диаграмм состояния по методам вычислительной термодинамики (CALPHAD – калькуляция фазовых диаграмм) [21]. При таком подходе выполняется оптимизация данных из разных источников, и построенные расчетные диаграммы достаточно хорошо согласуются с экспериментальными. Однако для тех многокомпонентных систем, которые представляют практический интерес при создании износостойких покрытий (**Ni-Fe-Cr-Si-B** и **Ni-Co-Fe-Cr-Mo-Si-B**), расчетные диаграммы и термодинамические данные для твердых растворов отсутствуют. В этой связи использование подхода, лежащего в основе вышеуказанного метода, необходимо совместить с аппроксимированными данными других экспериментальных методов и расчетов.

#### РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГИББСА И ЭНТАЛЬПИИ

Данный расчет в итоге позволяет оптимизировать составы аморфных порошковых композиций на основе железа и, варьируя режимами их предварительной обработки (диспергирование и аморфизация в размольных агрегатах), целенаправленно изменять их термодинамическую активность, то есть управлять стабильностью и технологичностью порошка, в частности, при нанесении покрытий, используя запасенную в материале энтальпию неравновесного фазового перехода.

При распаде аморфной фазы на несколько кристаллических фаз (соединения и твердые растворы) изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  в расчете на 1 моль аморфной фазы имеет вид:

$$\Delta G = \Delta G_{am} - \sum_i \Delta G_{cr,i}, \quad (8)$$

а изменение энтальпии

$$\Delta H = \Delta H_{am} - \sum_i \Delta H_{cr,i}. \quad (9)$$

Здесь нижний индекс «*am*» означает аморфную фазу, то есть многокомпонентный аморфный твердый раствор, индекс «*cr*» относится к кристаллической фазе, *i* – её номер,  $\Delta G_{cr,i}$  и  $\Delta H_{cr,i}$  – энергия Гиббса и энтальпия *i*-й кристаллической фазы при температуре превращения соответственно.

Энергия Гиббса при данной температуре описывается как

$$\Delta G_k = \Delta H_k - TS_k, \quad (10)$$

где индекс *k* означает любую фазу (аморфную или *i*-ю кристаллическую) или чистый элемент, *S* – энтропия *k*-й фазы.

При данной температуре *T* энтальпия и энтропия любого кристаллического вещества вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta H(T) &= \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T c_p(T) dT, \\ S(T) &= S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{c_p(T)}{T} dT, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta H_{298}^0$  – стандартная энтальпия образования фазы и  $S_{298}^0$  – ее энтропия при *T* = 298 К, *c<sub>p</sub>* – теплоемкость, которая зависит от температуры.

Стандартные значения энтальпии и энтропии чистых элементов, твердых кристаллических фаз (интерметаллидов, силицидов и боридов систем *Ni-Co-Fe-Cr-Mo-Si-B* и *Ni-Fe-Cr-Si-B*) и их теплоемкостей в виде полиномиальной зависимости от температуры *c<sub>p</sub>*(*T*) имеются в термодинамических справочниках [22 – 29]. Исходя из этих данных, по формулам (11) и (10) можно вычислить энтальпию, энтропию и энергию Гиббса кристаллических фаз; при этом входящие в формулу (11) интегралы легко вычисляются аналитически.

При распаде аморфной фазы многокомпонентных систем, содержащих никель и железо, наряду с соединениями образуются твердые растворы на основе *Ni* и *Fe*. Поскольку в данных системах радиусы атомов близки, то они являю-

тся растворами замещения, и для определения их термодинамических параметров (энергии Гиббса и энтальпии) можно использовать модель регулярного раствора [30]. В этой модели энергия Гиббса *i*-й фазы  $\Delta G_i = \Delta G_i(T)$ , состоящей из трех компонентов, обозначенных *A*, *B* и *C*, где *A* – основа сплава, описывается в виде

$$\begin{aligned} \Delta G_i &= x_A G_A^i + x_B G_B^i + x_C G_C^i + x_A x_B L_{A,B}^i + \\ &+ x_A x_C L_{A,C}^i + x_B x_C L_{B,C}^i + x_A x_B x_C L_{A,B,C}^i + \\ &+ RT(x_A \ln x_A + x_B \ln x_B + x_C \ln x_C). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь *x<sub>n</sub>*, *n* = *A*, *B*, *C* – мольная концентрация компонента *n* в твердом растворе в долях единицы (для трехкомпонентного раствора  $x_A + x_B + x_C = 1$ ),  $G_n^i = G_n^i(T)$  – энергия Гиббса *n*-го компонента раствора (фазы *i*), *L<sup>i</sup>* – параметры парного (*A-B*, *A-C* и *B-C*) и тройного (*A-B-C*) взаимодействия атомов в фазе *i*, которые характеризуют избыточную энтропию смешения компонентов по отношению к «идеальному раствору», в котором все *L<sup>i</sup>* = 0, *R* – универсальная газовая постоянная. В формуле (12) последнее слагаемое в правой части, содержащее множитель *RT*, описывает энтропию смешения компонентов.

Следует отметить, что в модели регулярного раствора замещения используется только конфигурационная энтропия, то есть избыточная энтропия смешения отсутствует. Во многих случаях параметры *L<sup>i</sup>* зависят от температуры и/или концентрации компонентов.

Для вещества-основы твердого раствора (элемент *A*) величина  $G_A^i(T)$  определяется по формулам (10) и (11) исходя из его стандартных термодинамических параметров. Для компонентов (*B* и/или *C*), тип кристаллической решетки которых в стандартном состоянии отличается от решетки фазы *i* (твердого раствора на основе металла *A*), вводится так называемый параметр стабильности  $F_n^i$ , *n* = *B*, *C*, характеризующий изменение энтальпии данного элемента при гипотетической перестройке его кристаллической решетки в решетку фазы *i* [30]:

$$G_n^i = \Delta H_n - TS_n + F_n^i, \quad (13)$$

где энтальпия  $\Delta H_n$  и энтропия  $S_n$   $n$ -го компонента при температуре  $T$  определяются по формулам (11),  $n = B, C$ .

Поскольку в модель регулярного раствора входит энтальпия смешения, описываемая параметрами  $L^i$ , то для определения энтальпии  $i$ -го твердого раствора  $\Delta H_i = \Delta H_i(T)$  формула (12) преобразуется к виду

$$\Delta H_i = x_A H_A^i + x_B H_B^i + x_C H_C^i + x_A x_B L_{A,B}^i + x_A x_C L_{A,C}^i + x_B x_C L_{B,C}^i + x_A x_B x_C L_{A,B,C}^i \quad (14)$$

Если кристаллическая решетка одного из компонентов ( $B$  и/или  $C$ ) отличается от решетки матрицы твердого раствора, то его вклад в энтальпию раствора ( $\Delta H_n^i$ ,  $n = B, C$ ) определяется по формуле, следующей из выражения (13):

$$\Delta H_n^i = \Delta H_n - F_n^i \quad (15)$$

Значения параметров  $L^i$  и  $F_n^i$ , необходимые для проведения расчетов энергии Гиббса и энтальпии по формулам (12) – (15) для конкретных систем, отсутствуют в термодинамических справочниках [22 – 29]. Их можно найти в статьях по термодинамическому расчету соответствующих бинарных и тройных равновесных диаграмм состояния (журналы Calphad, Journal of Alloys and Compound и другие), а для некоторых систем – в книгах [21, 30, 31].

Для многокомпонентной аморфной фазы возникают трудности с оценкой энергии Гиббса и энтальпии, поскольку она является неравновесной и не фигурирует в расчетах равновесных многокомпонентных диаграмм состояния по методу CALPHAD. В первом приближении можно рассматривать аморфную фазу как переохлажденный расплав, и использовать модель регулярного раствора для тройной или четверной системы, составляющей основу аморфной фазы (например, тройная диаграмма *Ni-Fe-Si* для сплава *Ni-Fe-Cr-Si-B*).

Значения параметров регулярного раствора ( $L^i$  в формулах (5), (7)) для переохлажденного расплава следует брать из работ по расчету

соответствующей тройной или четверной диаграммы, например, в [32] для диаграммы состояния *Ni-Fe-Si*. Для расплава параметры стабильности отсутствуют, то есть в формулах (12), (13) и (14)  $F_n^i = 0$ , где  $i = am$  (аморфная фаза).

Значения энтальпии  $\Delta H_n^i$  и энтропии  $\Delta S_n^i$  компонентов переохлажденного расплава, входящие в формулы (12) – (14), можно рассчитать следующим образом.

Рассмотрим термодинамический цикл, или ящик Вант-Гоффа: нагрев элемента  $n$  ( $n = A, B, C$ ) от температуры  $T = 298$  К до точки плавления  $T_m$  и переохлаждение ниже  $T_m$  до интересующей нас температуры распада аморфной фазы  $T < T_m$ . Тогда энтальпия и энтропия компонента  $n$  определяются как

$$\Delta H_n^{am}(T) = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^{T_m} c_{p,s}(T) dT + \Delta H_m + \int_{T_m}^T c_{p,m}(T) dT, \quad (16)$$

$$S_n^{am}(T) = S_{298}^0 + \int_{298}^{T_m} \frac{c_p(T)}{T} dT + \frac{\Delta H_m}{T_m} + \int_{T_m}^T \frac{c_p(T)}{T} dT, \quad n = A, B, C, \quad (17)$$

где  $\Delta H_m$  – энтальпия плавления данного чистого металла,  $c_{p,s}$  и  $c_{p,m}$  – его теплоемкость в твердом (нижний индекс  $s$ ) и расплавленном состоянии (нижний индекс  $m$ );  $\Delta H_m / T_m$  – изменение энтропии вещества при плавлении.

Для чистых веществ все параметры, входящие в формулы (16), (17), известны в справочной литературе [22 – 29].

При твердофазных превращениях развиваются внутренние напряжения, влияющие на величину энергии активации превращения  $AC$  в кристаллические фазы. Эти напряжения ( $\sigma$ ) можно оценить по данным рентгеноструктурного анализа закристаллизованного материала. Тогда формула (8) для изменения энергии Гиббса при кристаллизации  $AC$ , то есть энергия активации кристаллизации, примет вид

$$\Delta G = \Delta G_{am} - \sum_i (\Delta G_{\sigma,i} + E_{el,i}), \quad (18)$$

где  $E_{el,i}$  – упругая энергия в  $i$ -й кристаллической фазе.

Зная величину  $\sigma$ , энергию, связанную с упругой деформацией кристаллической фазы (в Дж/моль), можно в первом приближении оценить по формуле, известной в теории упругости [33]:

$$E_{el} = \frac{\sigma^2 \mu}{2Y \rho}, \quad (19)$$

где  $Y$  – модуль упругости,  $\rho$  – плотность и  $\mu$  – молекулярная масса кристаллической фазы.

Поскольку величина  $\Delta G$ , определяемая по формуле (18), в выражении (5) для энергии активации образования критического зародыша  $G^*$  находится в знаменателе и во второй степени, то малое изменение энергии Гиббса фазового перехода  $\Delta G$  может дать заметное изменение

величины  $G^*$ , имеющей смысл энергии активации процесса. Влияние упругой энергии на выделяющуюся теплоту при фазовом превращении мало, так что при оценке изменения энтальпии (формула (9)) этот фактор можно не учитывать.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена основанная на методах CALPHAD термодинамическая модель для теоретической оценки энергии активации превращения многокомпонентной аморфной фазы в кристаллические, а также определения выделяющейся при этом теплоты.

Рассматривая запасенную в аморфном порошке энтальпию неравновесного фазового перехода как новый технологический параметр, можно повысить энергоэффективность процессов консолидации аморфных дисперсий в макрообъемы, управлять их строением (формируя субмикроскопические и наноструктуры) и свойствами, создавать различные типы многофункциональных покрытий и изделий

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

1. Suryanarayana, C., Inoue, A. (2011), *Bulk Metallic Glasses*. Boca Raton, FL, CRC Press., 523 p.
2. Suryanarayana, C. (2004), *Mechanical Alloying and Milling*, New York, Marcel Dekker, 466 p.
3. Greer, A.L. (2009), Metallic glasses on the threshold. *Materials Today*, (1-2), pp. 14–22.
4. Mehrer, H. (2007), *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*, Berlin, Springer-Verlag, 651 p.
5. Perepezko, J.H., Allen, D.R., Foley, J.C. (1998), Nanocrystal development during primary crystallization of amorphous alloys. *Acta Materialia*, (20), pp. 431–440.
6. Глезер, А.М. (2012), Принципы создания многофункциональных конструкционных материалов нового поколения. *Успехи физических наук*, (5), С. 559–566.  
Glezer, A.M. (2012), Principles of creation of multipurpose constructional materials of new generation. [Principy sozdaniya mnogofunkcionalnykh konstruykcionnykh materialov novogo pokoleniya], *Успехи физических наук – Achievements of physical sciences*, (5), pp. 559–566.
7. Segal, V.M., Beyerlein, I.J., Tome, C.N., Chuvildeev, V.N., Kopylov, V.I. (2010), *Fundamentals and Engineering of Severe Plastic Deformation*. Hauppauge, NY, Nova Science Publ., Inc., 542 p.
8. Бейгельзимер, Я.Е., Варюхин, В.Н., Орлов, Д.В., Сынков, С.Г. (2003), *Винтовая экструзия - про-*

- цесс накопления деформации. Донецк, Фирма ТЕАН, 87 с.
- Beygel'zimer, Y.E., Varyuhin, V.N., Orlov, D.V., Syinkov, S.G. (2003), *Vintovaya ekstruziya – process nakoplenia deformacii* [Screw extrusion - deformation accumulation process], Donezk : Firma TEАН, 87 p.
9. Горелик, С.С., Добаткин, С.В., Капуткина, Л.М. (2005), *Рекристаллизация металлов и сплавов*, Москва, МИСиС, 432 с.
- Gorelik, S.S., Dobatkin, S.V., Kaputkina, L.M. (2005), *Рекристаллизация металлов и сплавов* [Recrystallization of metals and alloys], 3-е ed. Moscow, МИСиС, 432 p.
10. Green, P.F. (2005), *Kinetics, Transport, and Structure in Hard and Soft Materials*. Boca Raton, FL, CRC Press, 347 p.
11. Kissinger, H.E. (1957), Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, (11), pp.1702–1706.
12. Watanabe, T., Scott, M. (1980), The crystallization of the amorphous alloy  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ . *Journal of Materials Science*, (5), pp. 1131–1139.
13. Buschow, K.H.J. (1981), Thermal stability of amorphous  $ZrCu$  alloys. *Journal of Applied Physics*, (5), pp. 3319–3323.
14. Damson, B., Wurschum, R. (1996), Correlation between the kinetics of the amorphous-to-nanocrystalline transformation and the diffusion in alloys. *Journal of Applied Physics*, (2), pp. 747–751.
15. Любов, Б.Я. (1969), *Кинетическая теория фазовых превращений*, Москва, Metallurgy, 264 с.
- Lubov, B.Y. (1969), *Kineticheskaya teoriya fazovih prevracheniy* [Kinetic theory of phase transformations], Moscow, Metallurgy, 264 p.
16. Markov, I.V. (2003), *Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy*, London, World Scientific, 546 p.
17. Миссол, В. (1978), *Поверхностная энергия раздела фаз в металлах*, Москва, Metallurgy, 176 с.
- Missol V. (1978), *Poverhostnaya energiya razdela faz v metallah* [Superficial energy of the section of phases in metals], Moscow, Metallurgy, 176 p.
18. Jones, H. (2002), The solid-liquid interfacial energy of metals: Calculations versus measurements. *Materials Letters*, (4–5), pp. 364–366.
19. Jian, Z., Li, N., Zhu, M., Chen, J., Chang, F., Jie, W. (2012), Temperature dependence of the crystal-melt interfacial energy of metals. *Acta Materialia*, (8), pp. 3590–3603.
20. Белашенко, Д.К. (1970), *Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках*, Москва, Атомиздат, 400 с.
- Belachenko, D.K. (1970), *Yavleniya perenosa v zhidkih metallah i poluprovodnikah* [The transfer phenomena in liquid metals and semiconductors], Moscow, Atomizdat, 400 p.
21. Lukas, H.L., Fries, S.G., Sundman, B. (2007), *Computational Thermodynamics: The Calphad Method*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 313 p.
22. Кубашевский, О., Олкокк, С.Б. (1982), *Металлургическая термохимия*, Москва, Metallurgy, 392 с.
- Kubashevskiy, O., Olkock, S.B. (1982), *Metallurgicheskaya termohimiya* [Metallurgical thermochemistry]. Moscow, Metallurgy, 392 p.
23. Barin, I., Knacke, O. (1973), *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*, Berlin, Springer-Verlag, 921 p.

24. Barin, I., Knacke, O., Kubashevski, O. (1977), *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*. Supplement, Berlin, Springer-Verlag, 949 p.
25. Термические константы веществ (1979), Под ред. В. П. Глушко, Москва, ВИНТИ, 192 с. *Termicheskie konstanti vechestv* [Thermal constants of substances]. (1979). Under edition V.P. Glushko, Moscow, 192 p.
26. Термодинамические свойства индивидуальных соединений (1982), Под ред. В.П. Глушко, Москва, Наука, (1–4), 1234 с. *Termodinamicheskie svoystva individual'nyh soedineniy* [Thermodynamic properties of individual connections]. (1982), Under edition V.P. Glushko. Moscow, Nauka – Science, (1–4), 1234 p.
27. Barin, I. (1995), *Thermochemical Data of Pure Substances*. Third Edition, New York, NY, VCH Publishers, 2003 p.
28. Chase, M. W. (1998), NIST-JANAF Thermochemical Tables, 4th edition. *Journal of Physics and Chemistry Reference Data*, (9), pp. 1–1963.
29. Binnewies, M., Milke, E. (2002), *Thermochemical Data of Elements and Compounds*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 928 p.
30. Кауфман, Л., Бернштейн, Х. (1972), *Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ*, Москва, Мир, 326 с. Kaufman, L., Bernsteyn, H. (1972), *Raschet diagram sostoyaniya s pomochyu EVM* [Calculation of charts of a state by means of the PC]. Moscow, Mir – Peace, 326 p.
31. Saunders, N., Miodownik, A.P. (1998), *CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide*, Oxford, Elsevier Science Ltd., 479 p.
32. Dan Hao, Biao Hu, Kai Zhang, Lijun Zhang, Yong Du (2014), The quaternary Al-Fe-Ni-Si phase equilibria in Al-rich corner: Experimental measurement and thermodynamic modeling. *Journal of Materials Science*, (3), pp. 1157–1169.
33. Timoshenko, S., Young, D. (1962), *Elements of Strength of Materials*. Princeton: D.Van Nostrand Comp., Inc., 377 p.

Статья поступила в редакцию 30.10.2014 г.

## ВЛИЯНИЕ СШИВАЮЩИХ АГЕНТОВ НА НАБУХАНИЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА В ВОДЕ

И.А. Дорошенко, И.С. Алексеев

УДК 665.9.061

## РЕФЕРАТ

*БИОДЕГРАДИРУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ, НАБУХАНИЕ, ЯНТАРНАЯ КИСЛОТА, СШИВКА*

*Целью данной работы является определение степени набухания образцов поливинилового спирта сшитого насыщенными дикарбоновыми кислотами – сшивающими агентами, а также нахождение зависимости набухания от температуры сшивки и концентрации сшивающего агента. Определение степени набухания проводили по методике, аналогичной методу удлинения нитей. В результате экспериментальных исследований установлено, что оптимальная температура – 130 °С, так как при значении температуры в 120 °С, степень набухания образца с сшивающим агентом мало отличается от образца без агента, это говорит о том, что сшивка происходит не полностью, однако уже при 140 °С оба образца слабо набухают, следовательно, под действием температуры ПВС теряет способность растворяться в воде вследствие дегидратации и окисления. Достаточным количеством сшивающего агента, дикарбоновой кислоты, является включение 0,5 %.*

## ABSTRACT

*PHOTOCATALYTIC ACTIVITY, TITANIUM BASED FILMS, VACUUM MAGNETRON SPUTTERING, TITANIUM DIOXIDE, SILVER SELECTION*

*We have investigated the swell of the synthesized samples of polyvinyl alcohol crosslinked with a saturated dicarboxylic acid, - a crosslinking agent depending on the crosslinking temperature, and the concentration of crosslinking agent. Determination of the degree of swelling was performed according to the method similar to the method of elongation yarns. As a result of experimental studies found that the optimum temperature - 130 °C. A sufficient amount of crosslinking agent is the inclusion of 0.5%.*

В создании различных форм биологически активных повязок широко используется синтетический полимер – поливиниловый спирт (ПВС), который обладает высокой биосовместимостью. Достоинством этого полимера является пластичность, обеспечивающая хорошее моделирование повязки на раневой поверхности. Недостатком поливинилового спирта является низкая влагостойкость, которую можно устранить при помощи сшивки. Способность любого полимера к растворению характеризуется степенью набухания. Степень набухания характеризуется отношением массы набухшего полимера к массе исходного или отношением объема набухшего полимера к объему исходного. Максимальная степень набухания наблюдается только в случае

ограниченного набухания. При неограниченном набухании сначала происходит увеличение объема или массы полимера, а в дальнейшем растворение полимера.

При разработке биodeградируемых материалов на основе поливинилового спирта необходимо знать набухание, влияющее на скорость растворения изделия, и активность выделения действующих веществ из структуры материала.

Целью данной работы является определение степени набухания образцов поливинилового спирта сшитого насыщенными дикарбоновыми кислотами – сшивающими агентами [1 – 3], а также нахождение зависимости набухания от температуры сшивки, и концентрации сшивающего агента.



Актуальность и необходимость проведения данного исследования состоит в том, что при уменьшении одного из размеров исследуемых образцов, ближе к субмикронному диапазону, скорость набухания значительно возрастает, и известные [2, 4] параметры и зависимости не отражают в полной мере поведение образцов разрабатываемого материала при набухании, максимальная толщина которых составляет 7 – 8 мкм.

Набухание изучали на пленках сшитого поливинилового спирта. Пленки получали по следующей методике: навески поливинилового спирта растворяли в воде при нагревании на водяной бане. К полученному раствору добавляли водный раствор дикарбоновой кислоты и выливали в чашки Петри, высушивали на воздухе.

При исследовании образцов пленок (толщиной 0,09 – 0,12 мм) сшивку поливинилового спирта проводили при нагревании в воздушном стерилизаторе Витязь ГП-40-3 с программированным регулированием температуры с шагом 10 °С и временем 1 минута, при 130 °С в течение 10 минут.

Образцы пленок взвешивали на аналитических весах, погружали в воду и взвешивали через определенные промежутки времени. Степень набухания определяли по формуле (1):

$$Q = \frac{(m_H - m_{ИСХ}) \times 100}{m_{ИСХ}}, \quad (1)$$

где  $m_H$  – масса образца после набухания, г,  $m_{ИСХ}$  – исходная масса, г.

Результаты представлены в таблице 1.

Из таблицы видно, что образец с янтарной кислотой имеет наименьшую степень набухания. Далее в работе целесообразно её использование, так как для достижения необходимого уровня сшивки потребуется меньшее количество сшивающего агента.

Для контроля набухания тонких пленок (толщиной менее 10 мкм), которые наиболее близки по размерным характеристикам с разрабатываемыми биodeградируемыми материалами, применен метод [2], аналогичный методу удлинения нитей, состоящий в том, что сшитый образец полимера в виде пленки, образованной каплей (диаметр ~600 мкм) раствора ПВС на предметном стекле, помещают в микроскоп, измеряют диаметр, затем капается вода на пленку и отслеживается изменение размера при набухании. Измеряя диаметр после набухания можно рассчитать степень набухания, полимера по формуле

$$Q = \frac{(l_H - l_{ИСХ}) \times 100}{l_{ИСХ}}, \quad (2)$$

где  $l_H$  – размер образца после набухания, мкм,  $l_{ИСХ}$  – размер исходного образца, мкм.

В качестве сшивающего агента использована выбранная ранее янтарная кислота как наиболее эффективный сшивающий агент. Процесс набухания и некоторые этапы его контроля отражены на рисунках 1 – 3.

Процесс набухания ПВС фиксировался на микроскопе МИ-1 с TV камерой. Рабочий объектив 5x, 10x, 20x, 50x, 100x. Окуляр 10x. С помощью встроенного программного обеспечения были

Таблица 1 – Набухание ПВС сшитого кислотами при 130 °С в течение 10 минут

Степень набухания Q, %							
Время t, мин	10	15	30	45	60	120	360
Щавелевая кислота	115	175	243	249	262	267	-
Янтарная кислота	89	92	107	112	113	112	111
Фумаровая кислота	55	88	126	132	135	137	133
Малеиновая кислота	61	83	113	114	127	136	132

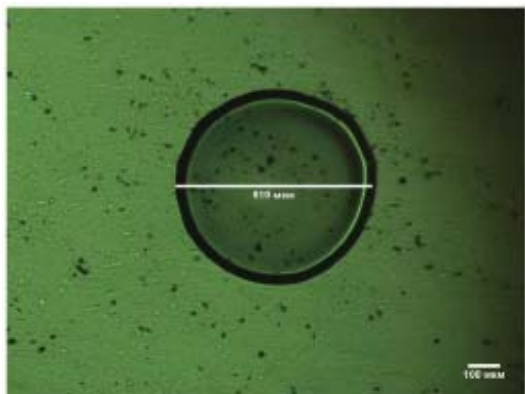


Рисунок 1 – Образец пленки ПВХ до набухания

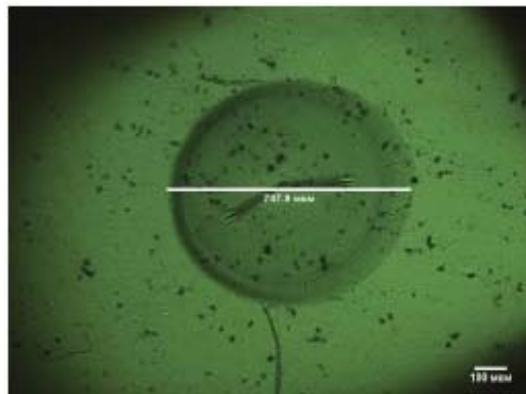


Рисунок 3 – Образец пленки ПВХ, набухание в течении 60 с

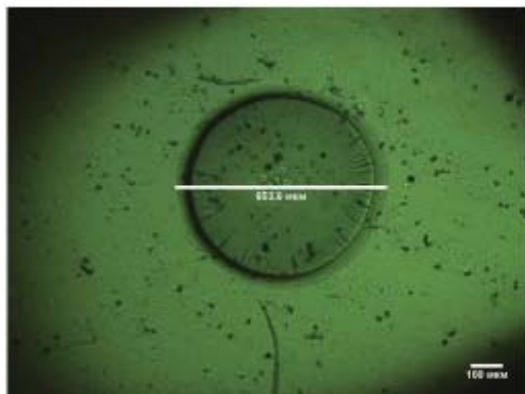


Рисунок 2 – Образец пленки ПВХ, набухание в течении 10 с

произведены замеры образцов через заданные промежутки времени. В таблице 2 приведены сравнительные данные по набуханию поливинилового спирта сшитого при разной температуре.

Влияние концентрации сшивающего агента на набухание образцов ПВХ графически отражено на рисунке 4.

Из полученных данных следует, что оптимальная температура – 130 °С, так как при значении температуры в 120 °С степень набухания образца с сшивающим агентом мало отличается от образца без агента, это говорит о том, что сшивка происходит не полностью, и сшивающий агент почти не влияет на набухание, однако уже при 140 °С оба образца слабо набухают, следовательно, под действием температуры ПВХ теряет способность растворяться в воде вследствие дегидратации и окисления [5], что не позволяет контролируемо получать требуемые значения степени набухания. Оптимальным количеством сшивающего агента, янтарной кислоты, является включение 0,5 %, так как меньшее количество практически не влияет на степень набухания, а с последующим увеличением его количества в растворе ПВХ значения степени набухания изменяются незначительно.

Выбранный по результатам проведенной работы сшивающий агент, его оптимальные температурные параметры сшивки и количествен-

Таблица 2 – Набухание поливинилового спирта сшитого янтарной кислотой при различной температуре в течение 10 мин

Температура, °С	120 °С	130 °С	140 °С	150 °С
	<b>Степень набухания Q, %</b>			
ПВС не сшитый, кислота 0 %	39,2	35,6	3,98	0,37
ПВС сшитый, янтарная кислота 1 %	34,8	22,3	3,73	0,27

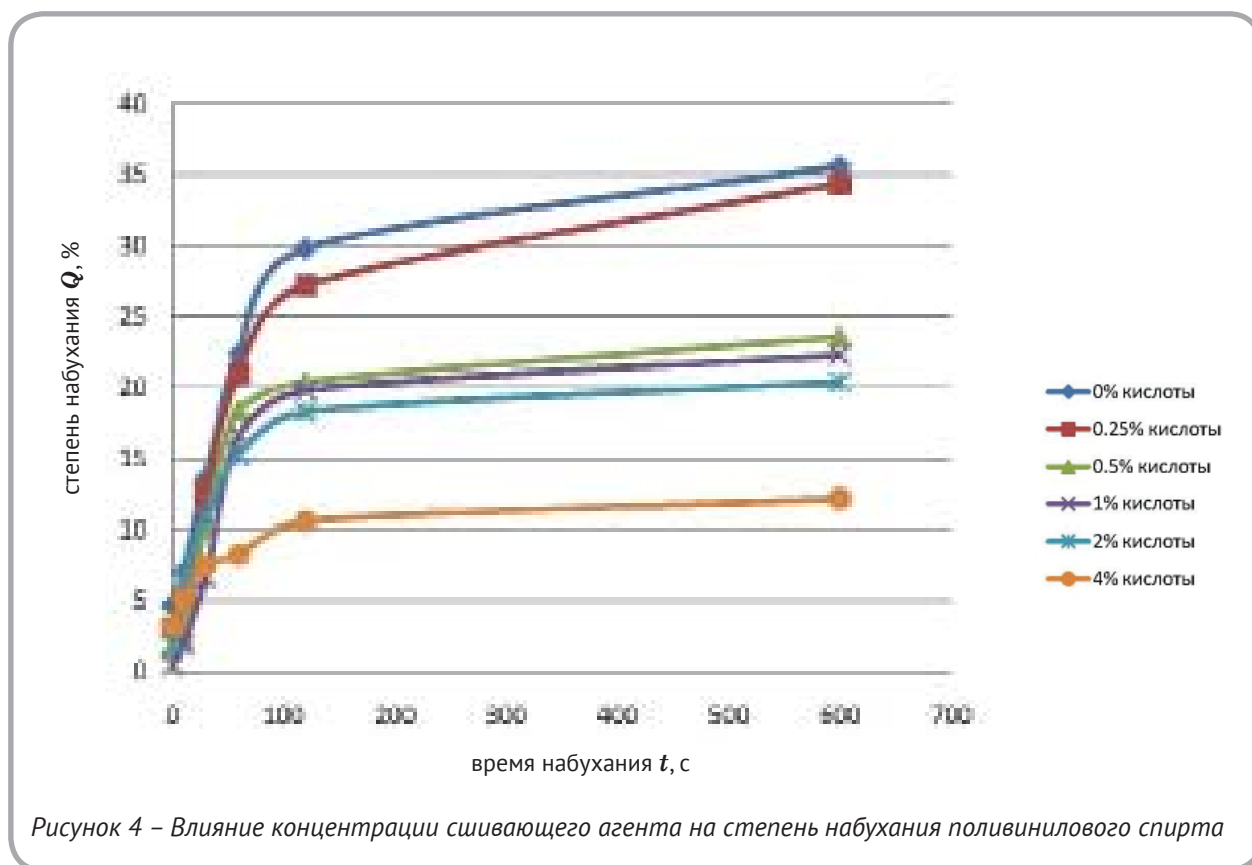


Рисунок 4 – Влияние концентрации сшивающего агента на степень набухания поливинилового спирта

ные значения добавки позволят при получении биodeградируемых материалов контролировать набухание образцов и получать необходимые значения скорости растворения материала и выделения действующих веществ (лекарств).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ямсков, И.А., Буданов, М.В., Даванков, В.А. (1979), Гидрофильные носители на основе поливинилового спирта для иммобилизации ферментов, *Биоорганическая химия*, 1979, Т. 5, № 11, С. 1728-1734.
2. Ковалева, С.С. (2006), Особенности поведения сшитого поливинилового спирта в водных растворах и растворах низкомолекулярных электролитов, *Сорбционные и хроматографические процессы*, 2006, т. 6, вып. 21, С. 198-210
3. Груздева, А.Н. (2005), Сорбционное разделение электролитов на поперечно сшитом поливиниловом спирте, *Журн. физ. химии*, 2005, Т. 79, № 7, С. 1325-1327.
4. Гораева, О.Ф. (2013), Исследование набухания поливинилоксалата, *Материалы докладов 46 РНТК ВГТУ*, Витебск, 2013, С. 205-206.
5. Ушаков, С.Н. (1960), *Поливиниловый спирт и его производные*, Москва, Том 1, 552 с.

## REFERENCES

1. Jamskov, I.A., Budanov, M.V., Davankov, V.A. (1979), The hydrophilic carriers based on polyvinyl alcohol for the immobilization of enzymes [Gidrofil'nye nositeli na osnove polivinilovogo spirta dlja immobilizacii fermentov], *Bioorganicheskaja himija – Bioorganic Chemistry*, 1979, T. 5, № 11, pp. 1728-1734.
2. Kovaleva, S.S. (2006), The behavior of cross-linked polyvinyl alcohol in aqueous solutions and in solutions of low molecular weight electrolytes [Osobennosti povedenija sshitogo polivinilovogo spirta v vodnyh rastvorah i rastvorah nizkomolekuljarnyh jelektrolitov], *Sorbcionnye i hromatograficheskie process – Sorption and chromatographic processes*, 2006, t. 6, vyp. 21, pp. 198-210.
3. Gruzdeva, A.N. (2005), Sorption separation electrolytes cross-linked polyvinyl alcohol [Sorbcionnoe razdelenie jelektrolitov na poperechno sshitom polivinilovom spirte], *Zhurn. fiz. himii – J. nat. Chemistry*, 2005, T. 79, № 7, pp. 1325-1327.
4. Goraeva, O.F. (2013), Study of swelling poliviniloksalates [Issledovanie nabuhaniya poliviniloksalata], *Materialy dokladov 46 RNTK VGTU – Proceedings of the 46 RSTC VSTU*, Vitebsk, 2013, pp. 205-206.
5. Ushakov, S.N. (1960), *Polivinilovyj spirt i ego proizvodnye* [Polyvinyl alcohol and derivatives thereof], Moskow, Tom 1, 552 p.

Статья поступила в редакцию 22.10.2014 г.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТЫ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ

А. В. Дубина, В. Н. Марцуль

УДК 628.3:674.05

### РЕФЕРАТ

*ОЧИСТКА, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ФОРМАЛЬДЕГИД, КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫЕ СМОЛЫ, ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ*

*В статье экспериментально подтверждена возможность использования лигносульфонатов при очистке сточных вод, содержащих компоненты карбаминоформальдегидных смол. Представлены результаты исследований влияния дозы лигносульфонатов от массы смолы, содержащейся в сточной воде, на эффективность удаления формальдегида и водорастворимых олигомеров из сточных вод.*

*Тематика работы актуальна, поскольку в процессе эксплуатации и при промывке оборудования для приготовления, хранения и дозирования клеевых составов образуются высококонцентрированные сточные воды, содержащие компоненты карбаминоформальдегидных смол. Имеющейся в настоящее время информации о составе, условиях образования и хранения сточных вод недостаточно для выбора способа очистки и обезвреживания сточных вод.*

### ABSTRACT

*CLEANING, TREATMENT, WASTE WATER, FORMALDEHYDE, UREA-FORMALDEHYDE RESIN, WOOD PROCESSING ENTERPRISES*

*The problem of selecting the effective methods for purifying the formaldehyde containing waste water is associated with an unstable composition, the deposition of condensates on the walls of containers and pipelines, changing the concentration of formaldehyde in the course of storage. The main reason for the difficulties associated with transportation and storage of waste water is determined by the content of water-soluble oligomers which may participate in the reactions of hydrolysis and polycondensation in aqueous solution. The maximum removal of water-soluble oligomers will simplify further purification and improve the operating conditions of the equipment. As a promising method for the removal of the aqueous phase oligomers formaldehyde resins can be regarded using of the compounds (polymers) capable to form insoluble products with them. Among the water-soluble polymers capable to form insoluble compounds with oligomers of urea-formaldehyde resins are of interest the lignosulfonic acid, which are the main component of large-tonnage by-product of sulphite pulp - technical lignosulfonates. In the technical lignosulfonates lignosulfonic acids are present as salts, preferably in the form of Na-salt.*

На деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь большинство клеевых составов, которые используются в производстве фанеры ДСП, МДФ, мебельных щитов и др., получают из карбамино-формальдегидных смол. В связи с вводом в эксплуатацию в 2011–2015 гг. новых производственных мощностей прогнозируется значительное увеличение их потребления.

Для предприятий, где производятся и используются карбамино-формальдегидные смолы (КФС), одной из проблем является очистка сточ-

ных вод, которые содержат продукты конденсации карбамида и формальдегида и свободный формальдегид.

Сточные воды, которые содержат остатки КФС, образуются в количестве до 26 м<sup>3</sup> на 1000 м<sup>3</sup> производимой продукции при промывке технологического оборудования и емкостей, используемых для производства, приготовления и применения клеевых составов.

Учитывая сложный состав сточных вод, характеризующийся содержанием дисперсной фазы и водорастворимых олигомеров, низкомо-

лекулярных соединений, очистка таких сточных вод с использованием традиционных способов (коагуляция, флокуляция, сорбция) не обеспечивает достижения показателей, установленных для сточных вод, отводимых в канализационные сети. В связи с этим сточные воды, как правило, не подвергаются очистке и после разбавления сбрасываются в канализацию.

Проблема выбора эффективных способов очистки данных сточных вод связана с нестабильным составом, отложением продуктов конденсации на стенках емкостей и трубопроводов, изменением концентрации формальдегида в процессе хранения.

Основная причина затруднений, связанных с транспортировкой и хранением сточных вод, обусловлена содержанием водорастворимых олигомеров, которые в водном растворе могут участвовать в реакциях поликонденсации и гидролиза. Максимальное удаление водорастворимых олигомеров позволит существенно упростить дальнейшую очистку и улучшить условия эксплуатации оборудования.

В качестве перспективного способа удаления из водной фазы олигомеров КФС может рассматриваться использование соединений (полимеров), способных образовывать с ними нерастворимые продукты.

Среди водорастворимых полимеров, способных образовывать нерастворимые соединения с олигомерами КФС, интерес представляют лигносульфоновые кислоты, которые являются основным компонентом многотоннажного побочного продукта производства сульфитной целлюлозы – технических лигносульфонатов. В технических лигносульфонатах лигносульфоновые кислоты присутствуют в виде солей, преимущественно в виде *Na*-соли.

Натриевые соли лигносульфоновых кислот полифункциональны и содержат метоксильные, фенольные и спиртовые гидроксильные группы, карбонильные, карбоксильные и сульфогруппы. Растворами кислот лигносульфонаты натрия легко переводятся в *H*-форму (лигносульфовую кислоту) [1–3].

Лигносульфонаты являются сильными анионными полиэлектролитами, а олигомерные продукты конденсации КФС – слабыми полимерными основаниями. Исходя из этого можно

предположить, что они могут взаимодействовать с образованием нерастворимого интерполимерного комплекса и тем самым способствовать удалению КФС из сточных вод. Такое взаимодействие возможно по донорно-акцепторному механизму с участием гидрофильных функциональных групп лигносульфонатов и КФС. Учитывая полидисперсность лигносульфонатов, возможно образование комплексов типа олигомер-олигомер, олигомер-полимер.

Известно, что метоксильные группы, содержащиеся в лигносульфонатах, в определенных условиях способны взаимодействовать с формальдегидом, поэтому, помимо удаления олигомеров КФС при добавлении в сточные воды лигносульфонатов, возможно связывание свободного формальдегида [3].

Целью данной работы является определение возможности и оценка эффективности применения лигносульфонатов в процессе очистки сточных вод, содержащих КФС.

Объектом исследования были сточные воды, образующиеся после промывки технологического оборудования, используемого для приготовления клеевых составов из карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-МТ-15, отобранные на ОАО «Мостовдрев» и ОАО «ФандОК». Состав сточных вод характеризовался концентрацией формальдегида – 1–5 г/дм<sup>3</sup>, химическим потреблением кислорода (ХПК) жидкой фазы – 15000–60000 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, сухим остатком – 50–80 г/дм<sup>3</sup>.

Учитывая, что в процессе хранения состав фаз, содержащихся в сточных водах, изменяется, то в исследованиях использовали водные растворы смолы КФ-МТ-15, состав которых полностью соответствовал составу сточных вод, образующихся в производственных условиях.

В работе использованы лигносульфонаты технические порошкообразные (ТУ 2455–002–00281039–2000) – порошок коричневого цвета. Содержание сухих веществ – 92,0 %, золы – 18,0 %, нерастворимых в воде веществ – 0,5 %, редуцируемых веществ – 10 %; значение pH 20 %-ного водного раствора – 4,5 %.

Концентрацию формальдегида определяли сульфитным методом с использованием БАТ-15 [4], значение pH растворов определяли на pH-метре pH-150, осадки отделяли на цен-

трифуге ОПн-8УХЛ4.2 при частоте 7000 мин<sup>-1</sup> в течение 5 мин.

Для образования нерастворимых комплексов типа олигомер-олигомер, олигомер-полимер необходимо соблюдать определенные соотношения между взаимодействующими полимерами в растворе.

Известно, что при использовании лигносульфонатов, для модификации КФС с целью снижения выделения формальдегида, их расход составлял до 20 % от массы смолы и соответствовал максимальной степени межмолекулярного взаимодействия между данными полимерами [5]. Поэтому в исследованиях соотношение масс КФС, содержащихся в сточных водах, и лигносульфонатов изменяли в диапазоне 0,05–0,2, что соответствует расходу 5–20 % лигносульфонатов от массы КФС.

Обработку сточных вод проводили в две стадии. На первой стадии в пробы сточных вод при перемешивании дозировали лигносульфонаты в количестве от 5 до 20 % от массы КФС. Лигносульфонаты вводили в сухом виде. После выдержки в течение 20 мин контролировали значение pH и определяли содержание формальдегида.

На второй стадии в пробы сточных вод, содержащие лигносульфонаты, добавляли концентрированную серную кислоту до pH = 2. После выдержки в течение 60 мин пробы центрифугировали и в фугате определяли содержание формальдегида. Для твердого осадка (кека) после сушки при температуре 105±2 °С определяли массу и снимали ИК-спектры. Используя данные о содержании КФС в сточной воде, дозе лигносульфонатов и массе высушенного осадка (кека) определяли степень взаимодействия КФС и лигносульфонатов. Аналогично с пробами сточных вод, в которые дозировали лигносульфонаты, обрабатывали пробу сточной воды, в которую они не вводились.

Как следует из экспериментальных данных, содержание формальдегида в жидкой фазе сточных вод уменьшается как после введения лигносульфонатов, так и после осаждения продуктов их взаимодействия с водорастворимыми олигомерами КФС.

Как видно из рисунка 1, добавление в сточную воду лигносульфонатов приводит к снижению содержания свободного формальдегида бо-

лее чем на 30 %. Значение pH сточной воды при этом находилось в диапазоне 5,0±0,2.

Снижение значения pH до 2, при добавлении серной кислоты, сопровождалось образованием дисперсной фазы и ее осаждением, которое было наиболее заметным в пробах с дозой лигносульфонатов более 10 %. В этих же пробах наблюдалось интенсивное хлопьеобразование. В контрольной пробе сточных вод и в пробе с дозой лигносульфонатов 5 % процесс образования новой фазы проходил по всему объему пробы. Дисперсная фаза осаждалась в течение 1 часа.

Как видно на рисунке 2, наибольшее снижение концентрации формальдегида достигается при дозе лигносульфонатов 15 % от массы КФС в сточной воде. В сравнении с контрольной пробой концентрация формальдегида снижается в 3 раза.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что при дозе лигносульфонатов 15 % от массы сточных вод происходит наиболее полное взаимодействие функциональных групп лигносульфонатов с формальдегидом и компонентами КФС и достигается наибольшее снижение концентрации формальдегида и водо-

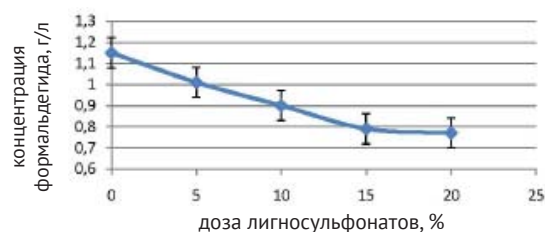


Рисунок 1 – Зависимость концентрации формальдегида от дозы ЛСГ на 1 стадии

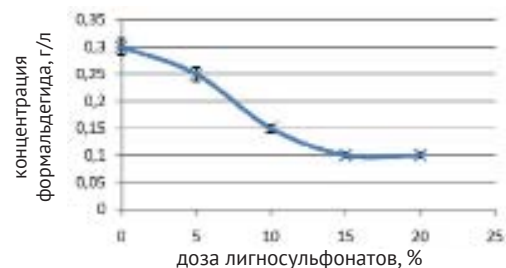


Рисунок 2 – Зависимость концентрации формальдегида от дозы лигносульфонатов после 2 стадии

растворимых олигомеров.

Данные, приведенные в таблице, подтверждают, что водорастворимые олигомеры и лигносульфонаты способны образовывать нерастворимый комплекс, который легко отделяется от воды и обезвоживается. Последнее, вероятнее всего, связано с тем, что в образовании комплекса участвуют гидрофильные группы КФС и лигносульфонатов, что подтверждается ИК-спектрами полученных осадков.

Анализ ИК-спектров осадков, полученных после центрифугирования, показал, что интенсивность полосы поглощения  $1557\text{ см}^{-1}$ , которая характеризует деформационные колебания **N-H**, и полосы поглощения в области  $3352\text{ см}^{-1}$ , которая характеризует валентные колебания **N-H** первичного амида, с увеличением дозы лигносульфонатов уменьшается. Также уменьшается интенсивность, относящаяся к валентным колебаниям **N-H** первичного амида, связанная водородной связью. Это можно объяснить участием сульфогрупп и аминогрупп в образовании межмолекулярных донорно-акцепторных связей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена возможность использования лигносульфонатов при очистке сточных вод, содержащих компоненты КФС. Уменьшение содержания компонентов КФС в сточных водах достигается в основном за счет донорно-акцепторного взаимодействия между олигомерами карбамидоформальдегидных смол и лигносульфонатами. Установлено, что

максимальная степень очистки от формальдегида достигается при дозе лигносульфонатов 15 % от массы КФС, содержащейся в сточной воде, и составляет 91 %. При этом водорастворимые олигомеры КФС практически полностью переходят в осадок, который легко отделяется от сточной воды и обезвоживается.

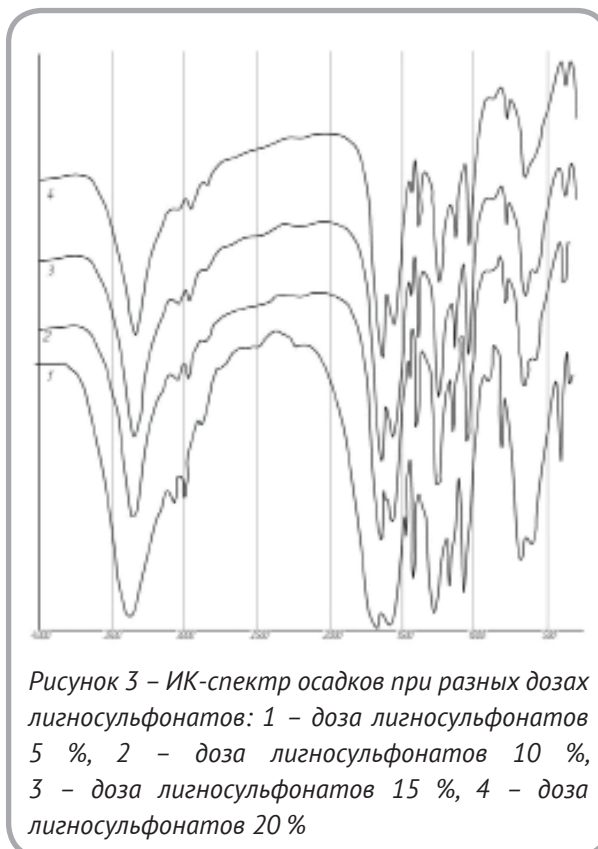


Рисунок 3 – ИК-спектр осадков при разных дозах лигносульфонатов: 1 – доза лигносульфонатов 5 %, 2 – доза лигносульфонатов 10 %, 3 – доза лигносульфонатов 15 %, 4 – доза лигносульфонатов 20 %

Таблица 1 – Результаты определения сухого остатка и массы осадков при разных дозах ЛГС

Доза лигносульфонатов, % от массы КФС в сточной воде	Отношение массы осадка к массе лигносульфонатов и КФС в сточной воде (по абс. сух. вещ.), %	Влажность осадка, %
0	86,0	69,5
5	86,6	67,0
10	91,0	65,0
15	96,8	63,5
20	97,4	64,0



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доронин, Ю.Г., Мирошниченко, С.Н., Свиткина, М.М. (1987), *Синтетические смолы в деревообработке*, Москва, 224 с.
2. Анохин, А.Е. (1992), *Сбор и утилизация формальдегидсодержащих жидких стоков: обзорная информация*, Москва, 34 с.
3. Barbusiński, K. (2005), Toxicity of Industrial Wastewater Treated by Fenton's Reagent, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 14, No. 1. pp. 11–16.

## REFERENCES

1. Dorohin, U.G., Miroshnichenko, S.H., Svitkina M.M. (1987), *Sinteticheskie smoly d derevoobrabotke* [Synthetic pitches in a woodworking], Moscow, 224 p.
2. Anohin, A.E. (1992), *Sbor i utilizaciya formal'degidsoderzhachih zhidkih stokov: obzornaya informaciya* [Collecting and utilization formaldegidsoderzhachikh of liquid drains: survey information], Moscow, Vol. 6, 34 c.
3. Barbusiński, K. (2005), Toxicity of Industrial Wastewater Treated by Fenton's Reagent, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 14, No. 1. pp. 11–16.

Статья поступила в редакцию 03. 11. 2014 г.

## СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДЫМЕ СИГАРЕТ

Н.П. Матвейко, А.М. Брайкова, В.В. Садовский

УДК 543.253

## РЕФЕРАТ

*ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, ЗДОРОВЬЕ, СИГАРЕТНЫЙ ДЫМ, МЕТОД ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ, ФИЛЬТРЫ СИГАРЕТ*

*Методом инверсионной вольтамперометрии исследовано содержание цинка, кадмия, свинца, меди и ртути в образцах дыма сигарет.*

*Установлено, что в дыме сигарет содержание тяжелых металлов меньше, чем в табаке сигарет.*

*Показано, что отношение количества тяжелых металлов, содержащихся в дыме сигарет, к их количеству, содержащемуся в табаке, неодинаково и зависит как от природы металла, так и от наименования сигарет. Это может быть обусловлено различиями: температурных условий сгорания табака, сорбционной способности пепла табака по отношению к тяжелым металлам, способности материалов фильтров сигарет задерживать выделяющиеся с дымом тяжелые металлы.*

*Отмечено также, что фильтры всех изученных наименований сигарет в той или иной степени улавливают в процессе курения **Cd**, **Pb**, **Cu** и **Hg**, однако для некоторых наименований сигарет фильтры не только не задерживают **Zn**, но и сами являются дополнительным источником поступления этого металла в сигаретный дым.*

В наших работах [1–3] методом инверсионной вольтамперометрии исследовано содержание тяжелых металлов в табаке и фильтрах сигарет до и после курения. Установлено, что не только табак, но и материалы фильтров сигарет содержат тяжелые металлы, причем в концентрациях иногда выше, чем в табаке сигарет. В некоторых случаях в материале фильтра до курения концентрация тяжелых металлов была выше, чем в материале фильтра выкуренной сигареты. Это значит, что фильтры не только не удерживают тяжелые металлы, но и сами являются дополнительным источником их поступления с дымом

## ABSTRACT

*HEAVY METALS, HEALTH, CIGARETTE SMOKE, METHOD OF AN INVERSION VOLTAMPEROMETRY, FILTERS OF CIGARETTES*

*By stripping voltammetry method it was investigated zinc, cadmium, lead, copper and mercury content samples of cigarette smoke. It was established that in cigarette smoke the heavy metal content is less than in tobacco cigarettes.*

*It is shown that the ratio of the amount of heavy metals contained in the cigarette smoke and in tobacco, is not the same and depends on the nature of metal and names of cigarettes items. This may be due to differences: temperature conditions of combustion of tobacco, the sorption capacity of the ashes of tobacco in relation to heavy metals, the ability of the materials of filter cigarettes to delay allocating the smoke heavy metals.*

*It is marked also, that the filters of all studied names of cigarettes in one or another degree catch in the process of smoking of **Cd**, **Pb**, **Cu** and **Hg**, however for the names of some cigarette filters not only **Zn** does not detain but also are the additional source of receipt of this metal in cigarette smoke.*

в организм человека.

Однако реальную угрозу здоровью человека оказывают тяжелые металлы, которые содержатся непосредственно в дыме выкуренных сигарет.

Известно, что дым сигарет включает два потока: основной, который вдыхает курящий человек, и дополнительный (побочный) поток дыма, который выделяется с кончика зажженной сигареты между затяжками и содержит наибольшие концентрации токсичных химических веществ, в том числе и тяжелых металлов. Причем установлено, что поступление токсичных веществ с по-

бочным потоком дыма является наиболее опасным, поскольку вещества попадают в организм человека в виде аэрозоля и имеют биологически и химически активную форму [4].

Согласно работам [5, 6] тяжелые металлы быстро поступают в системный кровоток, запускают процесс поражения сосудов. Кроме того, эти металлы обладают кумулятивными свойствами, в результате чего в организме курящего человека наблюдается накопление таких токсичных и канцерогенных элементов, как свинец, кадмий, ртуть. Общее количество кадмия, например, во внутреннем слое аорты курящего человека прямо пропорционально интенсивности и длительности курения. Его концентрация в сыворотке крови в 2–3 раза выше у курящих людей в сравнении с некурящими людьми. Особенно заметна эта тенденция у тех, кто выкуривает более 20 сигарет в день в течение 10 лет и больше. Было подсчитано, что за этот период в организм попадает более 1,5 кг различных химических веществ, причем масса тяжелых металлов может достигать 21 г при курении классических сигарет и 24 г – при курении легких сигарет. Одновременное злоупотребление алкоголем может привести к увеличению в крови курящего человека концентрации другого тяжелого металла – свинца. У людей, выкуривающих более десяти сигарет в день в течение десяти лет и больше, тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь) в повышенных концентрациях обнаруживают даже в хрусталике глаз [5].

Цель работы – методом инверсионной вольтамперометрии определить содержание цинка, кадмия, свинца, меди и ртути в дыме сигарет тех наименований (табл. 1), для которых ранее [1–3] было определено содержание этих металлов в табаке и фильтрах.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Необходимые для исследований растворы готовили, используя дважды дистиллированную воду (бидистиллят) и реактивы марки «ХЧ».

Выкуривание сигарет, которые для каждого наименования брали из той же пачки, что и при исследовании содержания тяжелых металлов в табаке и фильтрах, осуществляли с помощью водоструйного насоса, соединенного с поглотителем Рихтера. В поглотитель Рихтера помеща-

ли 10 мл водного раствора муравьиной кислоты концентрацией 0,1 моль/л. Дым, выделяющийся в процессе сгорания одной сигареты, поступал в поглотитель Рихтера, и содержащиеся в нем тяжелые металлы, экстрагировались 0,1 М водным раствором муравьиной кислоты.

Анализ экстракта на содержание **Zn, Cd, Pb** и **Cu** выполняли двумя способами:

1) без минерализации пробы;

2) после минерализации пробы экстракта. По первому способу аликвоту экстракта объемом 0,1 мл помещали в кварцевую электрохимическую ячейку, добавляли 0,13 мл концентрированной муравьиной кислоты и доводили объем раствора до 10 мл. Концентрация фонового электролита (раствор муравьиной кислоты) составляла 0,35 моль/л.

По второму способу 1,0 мл пробы экстракта дыма подвергали мокрой минерализации с использованием программируемой печи ПДП – 18М следующим образом. Пробы выпаривали при температуре 120–125 °С. Затем полученный остаток обрабатывали концентрированной азотной кислотой и 30 %-ным раствором пероксида водорода, снова выпаривали при температуре 120 – 125 °С до образования сухого остатка. Сухой остаток озоляли при температуре 450 °С в течение 30 минут. Обработку проб концентрированной азотной кислотой и 30 %-ным раствором пероксида водорода, выпаривание и озоление выполняли до получения однородной золы белого цвета. Зола растворяли в 1 мл концентрированной муравьиной кислоты, а объем раствора доводили до 10 мл бидистиллятом. Для вольтамперометрического анализа отбирали аликвоту объемом 0,3 мл, помещали в кварцевую электрохимическую ячейку, добавляли 0,1 мл концентрированной муравьиной кислоты, объем раствора доводили бидистиллятом до 10 мл. Концентрация фонового электролита (раствор муравьиной кислоты) составляла 0,35 моль/л.

Определение **Zn, Cd, Pb** и **Cu** в пробах экстракта дыма сигарет проводили на анализаторе вольтамперометрическом марки ТА–4 с применением амальгмированного серебряного индикаторного электрода, хлорсеребряного электрода сравнения, который являлся также вспомогательным электродом. Электрохими-

ческую очистку индикаторного электрода осуществляли при потенциале +100 мВ в течение 20 с. Накопление металлов на поверхности амальгмированного серебряного электрода выполняли при потенциале –1400 мВ в течение 20–40 секунд. Успокоение раствора – при потенциале –1100 мВ в течение 10 с. Регистрацию вольтамперных кривых выполняли при скорости развертки потенциала 70 мВ/с на фоне 0,35 М водного раствора муравьиной кислоты.

Для определения **Hg** отбирали пробы экстракта дыма сигарет объемом 0,1 мл, добавляли фоновый электролит (водный раствор, содержащий 0,4 моль/л  $H_2SO_4$ , 0,1 моль/л  $KNO_3$  и 0,001 моль/л динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (трилон Б)), доводя объем раствора до 15 мл. Полученный раствор анализировали на содержание **Hg** с помощью вольтамперметрического анализатора марки АВА–3, применяя углеситалловый индикаторный электрод, хлорсеребряный электрод сравнения и платиновый вспомогательный электрод. Анализ проводили в условиях, описанных в работах [2,3]: очистка углеситаллового индикаторного электрода при потенциале +450 мВ в течение 10 с; накопление ртути на поверхности индикаторного электрода при потенциале –1200 мВ в течение 60 – 90 с; успокоение раствора при потенциале +50 мВ в течение 3 с. Регистрацию вольтамперной кривой выполняли при скорости развертки потенциала 5 В/с на фоне водного раствора электролита, содержащего 0,4 моль/л  $H_2SO_4$ , 0,1 моль/л  $KNO_3$  и 0,001 моль/л Трилона Б.

Определение всех металлов проводили методом добавок, для чего использовали стандартный раствор, содержащий по 2 мг/л **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu**, который был приготовлен на основе Государственных стандартных образцов (ГСО) и бидистиллята. Отдельно из оксида ртути (II) готовили стандартный раствор, содержащий 2 мг/л **Hg**. Расчет содержания **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu** выполняли по разности вольтамперных кривых пробы и фона, пробы с добавкой стандартного раствора и фона с помощью специализированной компьютерной программы «VALabTx», а **Hg** – с помощью комплексной специализированной компьютерной программы, поставляемой ОАО «Буревестник» (Санкт-Петербург) совмест-

но с вольтамперметрическим анализатором марки АВА–3.

Каждую пробу анализировали не менее четырех раз. Все результаты обрабатывали методом математической статистики. При этом по методике, изложенной в работе [7], рассчитаны относительные стандартные отклонения (**Sr**) и интервальные значения содержания металлов в дыме сигарет при доверительной вероятности 95 % ( $\pm\Delta x$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры вольтамперных кривых, полученных при определении содержания **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu** в пробе экстракта дыма сигарет №3 (KENT HD (4)) приведены на рисунке 1.

Видно, что на вольтамперной кривой фонового электролита пики тока отсутствуют, что свидетельствует о чистоте электролита, в том числе и об отсутствии в нем **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu**. При анализе пробы экстракта дыма сигарет № 3 на вольтамперной кривой проявляется четкий пик тока в области потенциалов  $-1 \div -0,7$  В и возникают небольшие токи в области потенциалов:  $-0,54 \div -0,46$ ;  $-0,40 \div -0,30$ ;  $-0,40 \div +0,40$  В. Эти токи свидетельствуют о присутствии в образце экстракта дыма сигарет № 3 **Zn**, **Cd**, **Pb**, **Cu** соответственно. После добавления к пробе экстракта дыма стандартного раствора, содержащего по 2 мг/л каждого из определяемых металлов, пик тока окисления **Zn** увеличивается, и четко проявляются пики тока окисления **Cd**, **Pb**, **Cu**,

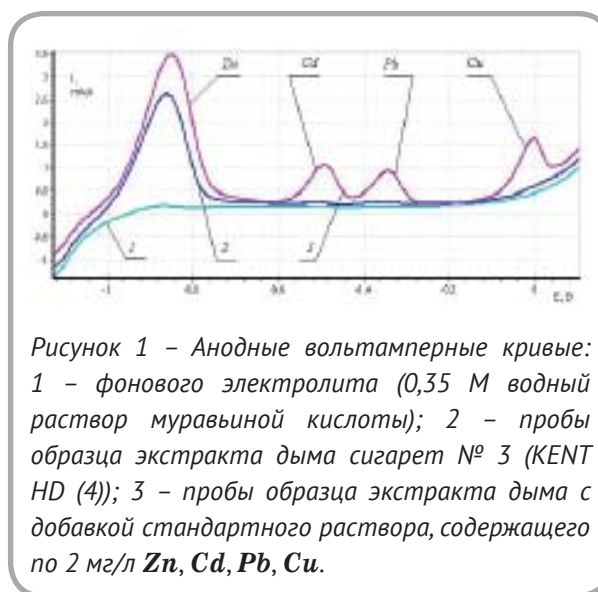


Рисунок 1 – Анодные вольтамперные кривые: 1 – фонового электролита (0,35 М водный раствор муравьиной кислоты); 2 – пробы образца экстракта дыма сигарет № 3 (KENT HD (4)); 3 – пробы образца экстракта дыма с добавкой стандартного раствора, содержащего по 2 мг/л **Zn**, **Cd**, **Pb**, **Cu**.

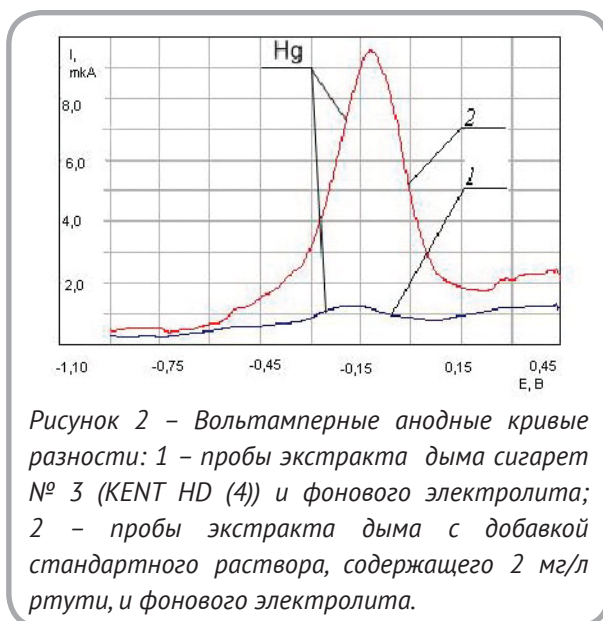
что связано с увеличением концентрации этих металлов в растворе электролита.

Аналогичные анодные вольтамперные кривые зарегистрированы для проб экстракта дыма всех исследованных наименований сигарет.

По разности вольтамперных кривых пробы и фона, пробы с добавкой стандартного раствора и фона с помощью специализированной компьютерной программы «VALabTx» рассчитано содержание каждого металла в образцах экстракта дыма всех исследованных наименований сигарет в пересчете на 1 кг выкуренного табака. Усредненные результаты, полученные на основании анализа экстракта дыма сигарет без минерализации проб и после мокрой минерализации проб: интервальные значения содержания **Zn, Cd, Pb, Cu** в дыме сигарет и относительные стандартные отклонения представлены в таблице 1.

На рисунке 2 в качестве примера приведены кривые разности вольтамперных кривых пробы и фонового электролита, а также пробы с добавкой стандартного раствора и фонового электролита, зарегистрированные с помощью анализатора марки АВА-3 при анализе экстракта дыма сигарет № 3 на содержание **Hg**.

Видно, что на кривой разности анодной вольтамперной кривой пробы экстракта дыма сигарет № 3 (KENT HD (4)) и фонового электролита (кривая 1) в интервале потенциалов от  $-0,38$  В до  $-0,05$  В имеется небольшой максимум



ма тока окисления, свидетельствующий о присутствии в экстракте дыма сигарет № 3 ртути. При введении в анализируемую пробу добавки стандартного раствора ртути, максимум анодного тока существенно увеличивается (кривая 2). Аналогичный характер изменения кривых разности анодных вольтамперных кривых пробы экстракта дыма, а также пробы экстракта дыма с добавкой стандартного раствора, содержащего 2 мг/л ртути, и фонового электролита наблюдается для всех исследованных наименований сигарет. На основании совокупности зарегистрированных вольтамперных кривых с помощью комплексной специализированной компьютерной программы рассчитано содержание ртути в дыме всех исследованных наименований сигарет в пересчете на 1 кг выкуренного табака. Результаты расчетов: интервальные значения содержания ртути в дыме сигарет и относительные стандартные отклонения представлены в таблице 1.

В таблице 2 для сравнения приведены данные, полученные в работе [2]: интервальные значения содержания **Zn, Cd, Pb, Cu** и **Hg** в табаке до курения и относительные стандартные отклонения.

Из таблиц 1 и 2 видно, что в дыме сигарет содержание тяжелых металлов меньше, чем в табаке сигарет. Меньше всего с дымом сигарет выделяется кадмия, причем в дыме сигарет № 1 (KENT CLICK SWITCH REFRESH), № 2 (KENT SILVER) и № 4 (CAMEL WHITE) кадмий не обнаружен. Не обнаружена в дыме сигарет № 2 (KENT SILVER) также и ртуть. Больше всего с дымом выделяется цинк – металл, который в наибольших количествах содержится и в табаке сигарет.

Вместе с тем, отношение количества тяжелых металлов, содержащихся в дыме сигарет, к их количеству, содержащемуся в табаке, неодинаково и зависит как от природы металла, так и от наименования сигарет. В частности, для цинка это отношение больше всего характерно для сигарет № 2 (KENT SILVER) и сигарет № 4 (CAMEL WHITE) – 64 и 52 % соответственно, а меньше всего для сигарет № 5 (LUCKY STRIKE) – 13 %. Что касается других тяжелых металлов, то можно отметить следующее. Отношение количества свинца и меди, содержащихся в дыме сигарет, к их количеству, содержащемуся в табаке, наибольшее для сигарет № 3 (KENT HD (4)) – 37 и

Таблица 1 – Содержания **Zn, Cd, Pb, Cu** и **Hg** в дыме сигарет в пересчете на 1 кг выкуренного табака

№ / наименование сигарет	Содержание металла, мг/кг табака									
	<i>Zn</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Cd</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Pb</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Cu</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Hg</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %
1/KENT CLICK SWITCH REFRESH	6,6±0,2	2,2	-	-	0,08±0,003	2,7	0,26±0,008	2,2	0,17±0,009	3,8
2/KENT SILVER	14,0±0,3	1,5	-	-	0,23±0,009	2,8	1,21±0,05	2,9	-	-
3/KENT HD (4)	5,6±0,2	2,6	0,016±0,0008	3,6	0,33±0,014	3,1	1,70±0,07	2,9	0,11±0,007	4,6
4/CAMEL WHITE	15,0±0,3	1,4	-	-	0,31±0,012	2,8	0,47±0,016	2,4	0,13±0,008	4,4
5/LUCKY STRIKE	3,6±0,1	2,0	0,002±0,0001	3,6	0,07±0,002	2,1	0,09±0,005	4,0	0,16±0,009	4,0
6/ PALL MALL NANOKINGS BLUE	5,9±0,2	2,4	0,002±0,0001	3,6	0,15±0,007	3,3	0,11±0,007	3,3	0,40±0,015	2,7

24 % соответственно. Меньше всего это отношение для сигарет № 5 (LUCKY STRIKE) – для свинца 3 %, а для меди 1 %. Отношение количества ртути, содержащейся в дыме, к ее количеству, содержащемуся в табаке, наибольшее для сигарет № 5 (PALL MALL NANOKINGS BLUE) – 7 %.

Такие различия содержания тяжелых металлов в табаке и дыме сигарет могут быть обусловлены различными факторами. Например, неодинаковыми температурными условиями сгорания табака, разной сорбционной способностью пепла табака по отношению к тяжелым металлам и, наконец, разной способностью материалов фильтров сигарет задерживать выделяющиеся с дымом тяжелые металлы.

В этой связи представляет интерес сравнить содержание тяжелых металлов в дыме сигарет, рассчитанное по разности их количества в табаке и пепле табака после курения (данные рабо-

ты [2]), и содержание этих металлов, полученное в результате анализа дыма сигарет. Результаты представлены в таблице 3.

Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что измеренное содержание **Cd, Pb** и **Hg** для всех исследованных наименований сигарет меньше рассчитанного. Это значит, что фильтры сигарет указанные металлы в той или иной степени улавливают в процессе курения. То же можно сказать и о меди. Исключение составляют лишь сигареты № 2 (KENT SILVER), для которых содержание меди в дыме по результатам расчета и измерения практически одинаково, то есть фильтры таких сигарет не улавливают медь из дыма. Иначе обстоит дело, если рассматривать содержание цинка. Для сигарет № 2 (KENT SILVER), № 3 (KENT HD (4)) и № 4 (CAMEL WHITE) измеренное содержание превышает рассчитанное содержание цинка. Это указывает на то, что

Таблица 2 – Содержания **Zn, Cd, Pb, Cu** и **Hg** в мг на 1 кг табака

№ сигарет	Содержание металла, мг/кг табака									
	<i>Zn</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Cd</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Pb</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Cu</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %	<i>Hg</i>	<i>S<sub>r</sub></i> , %
1	25±0,4	1,2	0,21±0,01	3,4	0,71±0,03	3,0	6,5±0,2	2,2	6,01±0,20	2,4
2	22±0,3	1,0	0,17±0,01	4,2	0,93±0,04	3,1	7,1±0,2	2,0	1,37±0,06	3,2
3	20±0,3	1,1	0,36±0,02	4,0	0,90±0,04	3,2	7,1±0,2	2,0	3,64±0,13	2,6
4	29±0,4	1,0	0,47±0,03	4,6	1,90±0,11	4,2	7,6±0,2	1,9	3,74±0,14	2,6
5	28±0,4	1,0	0,36±0,02	4,0	2,40±0,13	3,9	7,6±0,2	1,9	2,45±0,10	3,0
6	38±0,6	1,1	0,30±0,02	4,8	1,20±0,05	3,0	8,2±0,2	1,8	5,40±0,17	2,3

Таблица 3 – Содержания **Zn**, **Cd**, **Pb**, **Cu** и **Hg** в дыме сигарет в пересчете на 1 кг выкуренного табака

№ сигарет	Содержание металла, мг/кг табака									
	<b>Zn</b>		<b>Cd</b>		<b>Pb</b>		<b>Cu</b>		<b>Hg</b>	
	рассчитанное	измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное	измеренное
1	9,0	6,60	0,05	–	0,36	0,08	1,60	0,26	3,60	0,17
2	2,0	14,0	0,13	–	0,51	0,23	1,20	1,21	0,06	–
3	2,0	5,6	0,32	0,016	0,48	0,33	1,90	1,70	1,74	0,11
4	1,0	15,0	0,47	–	1,26	0,31	1,20	0,47	1,73	0,13
5	11,0	3,6	0,26	0,002	2,06	0,07	2,1	0,09	1,13	0,16
6	6,0	5,9	0,30	0,002	0,49	0,15	1,3	0,11	1,69	0,40

фильтры названных сигарет не только не удерживают цинк, но и сами являются дополнительным источником поступления этого металла в сигаретный дым.

#### ВЫВОДЫ

1. Определено, что в дыме сигарет содержание тяжелых металлов меньше, чем в табаке сигарет. При этом в дыме сигарет № 1 (KENT CLICK SWITCH REFRESH), № 2 (KENT SILVER) и № 4 (CAMEL WHITE) кадмий не обнаружен. Не обнаружена в дыме сигарет № 2 (KENT SILVER) также и ртуть.

2. Показано, что отношение количества тяжелых металлов, содержащихся в дыме сигарет, к их количеству, содержащемуся в табаке, не

одинаково и зависит как от природы металла, так и от наименования сигарет. Это может быть обусловлено не одинаковыми температурными условиями сгорания табака, разной сорбционной способностью пепла табака по отношению к тяжелым металлам, а также разной способностью фильтров сигарет задерживать выделяющиеся с дымом тяжелые металлы.

3. Установлено, что фильтры сигарет в той или иной степени улавливают при курении **Cd**, **Pb** и **Hg**, фильтры сигарет № 2 (KENT SILVER) не задерживают **Cu**, а фильтры сигарет № 2 (KENT SILVER), № 3 (KENT HD (4)) и № 4 (CAMEL WHITE) являются дополнительным источником поступления в сигаретный дым **Zn**.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матвейко, Н.П., Брайкова, А.М., Садовский, В.В. (2014), Сигареты и здоровье человека, *Біологія і хімія*, № 2, С. 57–63.
2. Матвейко, Н.П., Брайкова, А.М., Садовский, В.В. (2014), Определение содержания тяжелых металлов в табаке сигарет и продуктах его сгорания, *Вестник БГЭУ*, Вып. 3, С. 65–70.
3. Брайкова, А.М., Матвейко, Н.П., Садовский, В.В. (2014), Инверсионно-вольтамперометрический контроль тяжелых металлов в фильтрах сигарет, *Вестник ВГТУ*, Выпуск 26, С. 103–109.
4. Андреева, Т.И., Красовский, К.С. (2004), *Табак и здоровье*, Киев, 224 с.
5. Зербино, Д.Д., Соломенчук, Т.М., Лесник, С.А., Фус, С.В., Москалик, О.С. (2003), Ксенобіотики в сигаретах, *Сердце і судини*, № 3, С. 156 – 159.
6. Зербино, Д.Д., Соломенчук, Т.М., Тошлко, О.Ю. (2003), Ксенобіотики в сигаретах і сигаретному димі: куріння легких сигарет не знижує ризик надходження в організм людини важких металів, *Укр. мед. часопис*, № 4(36). С. 130 – 133.
7. Характеристики погрешности результатов количественного химического анализа. Алгоритмы оценивания: МИ 2336–95, Введ. 09.12.1997, Екатеринбург, 1995, 45 с.

## REFERENCES

1. Matveiko, N.P., Braikova, A.M., Sadovsky, V.V. (2014), Cigarettes and Health [Sigarety I zdorov'e cheloveka], *Biyalogiya I himiya – Biology and Chemistry*, 2014, № 2, pp. 57-63.
2. Matveiko, N.P., Braikova, A.M., Sadovsky, V.V. (2014), Determination of heavy metals in cigarette tobacco and its combustion products [Opredelnie soderzhaniya tyazhelyh metallov v tabake sigaret I produktah ego sgoraniya], *Bulletin BGEU*, 2014, Vol. 3, pp. 65-70.
3. Matveiko, N.P., Braikova, A.M., Sadovsky, V.V. (2014), Stripping voltammetric monitoring of heavy metals in cigarette filters [Inversionno-voltamperometricheskiy control tyazhelyh metallov v filtrah sigaret], *Bulletin VSTU*, 2013, Issue 26, pp. 103-109.
4. Andreeva, T.I., Krasovskii, K.S. (2004), *Tabak I zdorov'e* [Tobacco and Health], Kyiv, 2004, 224 p.
5. Zerbino, D.D., Solomenchuk, T.M., Lesnik, S.A., Foos, S.V., Moskalik, O.S. (2003), Xenobiotics in cigarettes [Kxenobiotiki v sigaretah], *Serdce I sudini – Heart and blood vessels*, 2003, № 3, pp. 156 - 159.
6. Zerbino, D.D., Solomenchuk, T.M., Toshlko, O.J. (2003), Xenobiotics in cigarettes and cigarette smoke: smoking light cigarettes do not reduce the risk of being in the body of heavy metals [Kxenobiotiki v sigaretah I sigaretnomu dimi: kurinnya legkih sigaret ne znizhue rizik nadozhennya v organism ludini vazhkih metaliv], *Ukr. med. Chasopis – Ukr. medical Journal*, 2003, № 4 (36), pp. 130 - 133.
7. Harakteristiki pogreshnosti rezul'tatov kolichestvennogo himicheskogo analiza. Algoritmy ocenivaniya [Characteristics of error in the results of quantitative chemical analysis. Estimation algorithms: MI 2336-95. - Enter. 09.12.1997. - Ekaterinburg, 1995. - 45 p.

Статья поступила в редакцию 30.10.2014 г.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В.Е. Савенок, А.С. Марущак

УДК.504.5:628.3:622.692.55

### РЕФЕРАТ

*ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД, ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ, РАСЧЕТ*

Одним из негативных факторов работы очистных сооружений промышленных предприятий является наличие выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Целью данной работы была оценка и анализ методик определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, образующихся при работе очистных сооружений на предприятиях нефтехимического комплекса.

Для определения максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ от данных источников применяются инструментально-расчетные и расчетные методы. При применении инструментально-расчетных методов для определения выбросов загрязняющих веществ используется технический кодекс установившейся практики (ТКП) 17.08–16–2011 (02120). При применении расчетных методов используется новое пособие в области охраны окружающей среды П-ООС 17.08–01–2012 (02120). В расчетном методе используются справочные значения величин, являющиеся максимально возможными при эксплуатации объектов данного типа с максимальной нагрузкой, поэтому полученные значения выбросов значительно больше, чем полученные инструментально-расчетным методом.

Использование инструментально-расчетных методов для определения максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ от объектов очистных сооружений повышает точность их определения.

Очистные сооружения сточных вод являются необходимым элементом любого крупного промышленного объекта. Основное назначение работы очистных сооружений – очистка промышленных сточных вод до нормируемых значений

### ABSTRACT

*POLLUTING SUBSTANCES, TOOL, METHOD, TREATMENT FACILITIES, CALCULATION*

*Basic purpose of work of treatment facilities - purification of industrial sewage to normalized values before their dumping in a city collector or directly in water object.*

*In work the assessment and the analysis of techniques of definition of emissions of polluting substances in the atmospheric air, the treatment facilities which were formed during the work at the enterprises of a petrochemical complex was carried out. Features of application of tool and settlement and settlement methods are considered when determining emissions of polluting substances from the equipment and objects of treatment facilities.*

*By results of the conducted researches it is established that use of tool and settlement methods for definition of the maximum and gross emissions of polluting substances from objects of treatment facilities increases the accuracy of their definition.*

перед сбросом их в городской коллектор или непосредственно в водный объект. Одним из негативных факторов работы очистных сооружений является наличие выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Целью данной работы была оценка и анализ методик определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, образующихся при работе очистных сооружений на предприятиях нефтехимического комплекса.

Все виды очистных сооружений можно разделить на три типа по технологическому принципу очистки сточных вод – механический, химический и биологический, которые могут комбинироваться друг с другом, образуя системы многоступенчатой очистки.

В механическом способе очистки используется свойство природного самоочищения сточных вод. Наиболее простые очистные установки этого типа – септики, в которых доочистка сточных вод производится за счет фильтрующих и очищающих свойств грунта.

Этот способ применим на хорошо фильтрующих грунтах с достаточно низким уровнем грунтовых вод (более 2,5 м). При наличии грунтов со слабой способностью к впитыванию (плитняк, глина, суглинок, высокий уровень грунтовых вод) устраивается искусственная фильтрационная площадка. К преимуществам механического способа очистки относятся: низкая цена, энергонезависимость, отсутствие необходимости в использовании реагентов, простота обслуживания. К недостаткам следует отнести тот факт, что сооружения подземной фильтрации требуют определенных гидрогеологических условий (низкий уровень грунтовых вод, соответствующий грунт).

Химический способ предусматривает применение различных реагентов, которые добавляются в сточную воду и переводят растворенные примеси в труднорастворимое состояние с последующим осаждением этих веществ на дне. При этом необходимо соблюдать точную дозировку реактивов. Используемые реактивы стоят довольно дорого, поэтому этот метод применяют в основном для очистки производственных сточных вод, когда другие виды очистки малоэффективны.

На сегодня третий вид очистки сточных вод – биологический – является самым прогрессивным и эффективным. Его по праву считают оптимальным техническим решением проблемы утилизации бытовых сточных вод. Станции глубокой биологической очистки в отличие от септиков не накапливают загрязнения, а осуществляют их

очистку, которая достигает 99 %. Процесс биологической очистки заключается в биохимическом разрушении органических веществ микроорганизмами в процессе своей жизнедеятельности. Бактерии (или микроорганизмы) используют эти вещества как источник питания. В результате этих процессов вредные органические вещества окисляются, и происходит их распад на безвредные неорганические. Системы биологической очистки сточных вод бывают нескольких видов: сооружаемые на месте или системы полной заводской готовности, а также моноблочные и состоящие из нескольких отдельных блоков (модулей).

Различное оборудование и объекты очистных сооружений являются неорганизованными источниками выбросов загрязняющих веществ. В соответствии с [1, с.28], для определения максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ от данных источников применяются инструментально-расчетные и расчетные методы. При применении инструментально-расчетных методов для определения выбросов загрязняющих веществ используется новый технический нормативный правовой акт (ТНПА) в области инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух: технический кодекс установившейся практики (ТКП) 17.08–16–2011 (02120) [2]. Данный документ разработан впервые и введен в действие с января 2012 года. При применении расчетных методов для определения выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) используется новое пособие в области охраны окружающей среды (ООС) и природопользования: П-ООС 17.08–01–2012 (02120) [3]. Данный документ разработан впервые и введен в действие с сентября 2012 года.

Рассмотрим особенности применения данных нормативных документов [2, 3] при определении выбросов загрязняющих веществ от оборудования и объектов очистных сооружений предприятий нефтехимического комплекса.

ТКП 17.08–16–2011 (02120) [2] устанавливает порядок определения максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух инструментально-расчетными методами для основных источников выбросов объектами предприятий нефтехимической отрасли, в том числе и для тех объектов очистных

сооружений, которые являются горизонтальными поверхностями выделения загрязняющих веществ.

Требования настоящего технического кодекса распространяются на стационарные организованные и неорганизованные источники выбросов при производстве продукции предприятиями нефтехимической отрасли и другими предприятиями, эксплуатирующими объекты с аналогичными источниками выделения загрязняющих веществ и источниками выбросов. Требования настоящего технического кодекса применяют при расчете величин выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, которые используются при:

- инвентаризации и нормировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- государственном, ведомственном, производственном контроле за соблюдением установленных нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- оценке воздействия на окружающую среду и проведении государственных экспертиз;
- исчислении налога за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- установлении разрешенных величин выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- разработке проектной документации на строительство, реконструкцию, расширение, техническое перевооружение, модернизацию, изменение профиля производства, ликвидацию объектов и комплексов;
- ведении учета выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду;
- ведении отчетности о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- иных мероприятиях по охране атмосферного воздуха, предусмотренных законодательством Республики Беларусь.

Эксплуатация горизонтальных поверхностей выделения сопровождается выбросами в атмосферный воздух загрязняющих веществ, содержащихся в технологических средах и находящихся на этих поверхностях, а также продуктов их превращений. В главе 9 [2] изложены методики определения выбросов загрязняющих веществ от горизонтальных поверхностей выделе-

ния инструментально-расчетными методами, то есть в расчетных формулах используются некоторые инструментально замеренные величины.

Для проведения инструментальных замеров предварительно проводится подготовка, включающая в себя составление в масштабе плана расположения горизонтальных поверхностей выделения (пример на рисунке 1) на котором горизонтальные поверхности выделения могут объединяться в один неорганизованный источник выброса. При объединении должны соблюдаться основные условия:

- расстояния между неорганизованными источниками выбросов не должны превышать 25 м;
- компонентный состав выделяемых загрязняющих веществ однотипен;
- наибольший из размеров горизонтальной поверхности выделения, включающего в себя несколько неорганизованных источников выбросов, не должен превышать 300 м.

На план наносится примерное расположение условной плоскости и измерительного сечения. Далее производят соответствующие замеры, соблюдая условия, изложенные в [2, с.29]. Измеренные величины подставляют в формулы (1)-(4) и производят расчет.

Средний перенос  $i$ -го загрязняющего вещества через измерительное сечение рассчитывается по формуле [2, с. 30]:

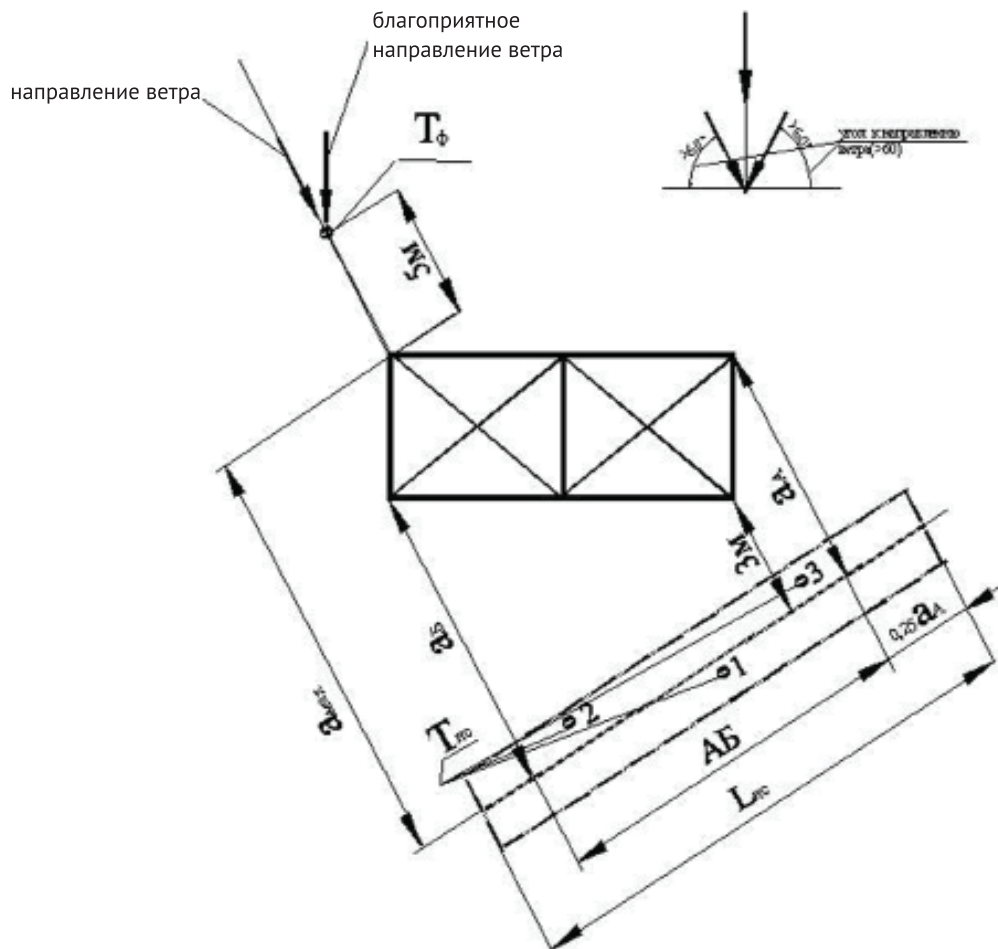
$$\bar{P}_i = (\bar{c}_i^{uc} - \bar{c}_i^{\phi}) \bar{W} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(с}\cdot\text{м}^2), \quad (1)$$

где  $\bar{c}_i^{uc}$  – средняя концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества в измерительном сечении, мг/м<sup>3</sup>;  $\bar{c}_i^{\phi}$  – фоновая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества в измерительном сечении, мг/м<sup>3</sup>;  $\bar{W}$  – средняя скорость ветра в измерительном сечении, м/с.

Площадь измерительного сечения  $F_{uc}$  рассчитывается по формуле [2, с. 30]:

$$F_{uc} = 0,42(a_A + a_B + a_{max}) + 2,5 \cdot AB, \text{ м}^2, \quad (2)$$

где 0,42 и 2,5 – коэффициенты преобразований, м;  $a_A$  и  $a_B$  – расстояние по направлению ветра от концов проекции источника выброса на услов-



$T_\phi$  – точка измерения фоновой концентрации ЗВ;  $T_{ис}$  – точки измерения концентрации ЗВ в измерительном сечении;  $a_A, a_B, a_{max}$  – расстояния от источника по направлению ветра до измерительного сечения слева, справа и максимальное соответственно;  $AB$  – длина проекции источника на условную плоскость (измерительное сечение;  $L_{ис}$  – длина измерительного сечения ( $AB + 2 \cdot 0,25a_A$ ))

Рисунок 3 – План расположения горизонтальной поверхности выделения с расчетной схемой (неорганизованный источник - нефтеловушка)

ную плоскость до источника выброса, м;  $a_{max}$  – максимальное расстояние между условной плоскостью и наветренной стороной источника выброса по направлению ветра, м;  $AB$  – длина проекции источника выброса на условную плоскость, м.

Массовый выброс  $i$ -го загрязняющего вещества рассчитывается по формуле [2, с. 29]:

$$M_i = \bar{P}_i \cdot F_{ис} \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_3, \text{ г/с}, \quad (3)$$

где  $\kappa_2$  – коэффициент учета периферийного рассеивания загрязняющего вещества в верти-

кальном направлении, определяемый по таблице Е1 в зависимости от среднего расстояния от условной поверхности до наветренной стороны неорганизованного источника  $\bar{a}$  [2, с. 74];  $\kappa_3$  – коэффициент зависимости выбросов от средней скорости ветра по измерительному сечению, определяемый по таблице Е2 [2, с.75].

Валовой выброс  $i$ -го загрязняющего вещества  $G_i$  рассчитывается по формуле [2, с. 15]:

$$G_i = \sum_{it}^v \bar{M}_{it} \cdot \tau_i \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}, \text{ т/год}, \quad (4)$$

где  $M_{it}$  – средний массовый выброс  $i$ -го загряз-

няющего вещества из доверительного интервала, полученного в результате выполнения оценки неопределенности измерений в  $t$ -ом режиме работы источников выделения загрязняющих веществ, определенный в соответствии с формулой (3), г/с;  $\tau_i$  – продолжительность режима работы источника выбросов, час/год;  $v$  – количество режимов работы источника выбросов;  $3,6 \cdot 10^{-3}$  – коэффициент преобразования, 1/час.

Для определения выбросов ЗВ расчетным методом используется П-ООС 17.08-01-2012 (02120) [3]. Особенность его применения является то, что оно устанавливает порядок расчета максимальных и валовых выбросов загрязняющих атмосферу веществ от проектируемых объектов производительностью не более 500 м<sup>3</sup> в сутки и действующих объектов очистных сооружений с фактической производительностью не более 500 м<sup>3</sup> в сутки, в том числе от сооружений совместной очистки промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, ливневой канализации, очистных сооружений животноводческих комплексов, очистных сооружений предприятий пищевой промышленности. Применения данного пособия для расчета выбросов ЗВ от очистных сооружений допускается для объектов нефтехимического комплекса, относящихся к объектам воздействия на атмосферный воздух четвертой и пятой категории. Также в соответствии с [1, гл. 3] применение расчетных методов, изложенных в [3], допускается при отсутствии метрологически аттестованных в установленном порядке методик выполнения измерения какого-либо загрязняющего вещества.

Область распространения и применения требований, изложенных в [3], аналогична как и в [2].

В общем случае, максимальный выброс  $i$ -того загрязняющего вещества рассчитывается согласно [3, формула (4)]:

$$M_i = 2,905 \cdot F \cdot K_y \cdot C_{imax} \cdot K_M \cdot \frac{290}{\sqrt{m_i}} \cdot 10^{-7}, \text{ г/с}, \quad (5)$$

где 2,905 – коэффициент преобразования, рассчитанный для скорости ветра 4 м/с на высоте 1,5 м от поверхности воды или перекрытия;  $F$  – площадь поверхности испарения объекта очистного сооружения, м<sup>2</sup>;  $K_y$  – коэффициент

перекрытия объекта очистного сооружения, определяемый по таблице А.1 [3];  $C_{imax}$  – максимальное значение равновесной концентрации загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях (температура 0 °С, давление 101,3 кПа), определяемое либо по таблицам Б.1, Б.2 [3], либо расчетным путем в соответствии с пп.5.2.1, 5.2.2 [3];  $K_M$  – коэффициент учета зависимости величин выбросов от стадии очистки (места объекта в схеме очистки), определяемый по таблицам А.2, А.3 [3];  $m_i$  – молекулярная масса  $i$ -того загрязняющего вещества, определяемая по таблице А.4 [3].

Максимальный выброс  $i$ -того загрязняющего вещества от песковых и иловых площадок рассчитывается согласно [3, формула (8)]:

$$M_i = 2,905 \left[ \frac{V_{осадка}}{0,2} \cdot K_{m1} + (F - \frac{V_{осадка}}{0,2}) \cdot K_{m2} \right] \cdot K_y \cdot C_{imax} \cdot \frac{290}{\sqrt{m_i}} \cdot 10^{-7}, \text{ г/с}, \quad (6)$$

где  $V_{осадка}$  – наибольший из объемов выгрузки осадка из какого-либо отстойника, м<sup>3</sup>;  $K_{m1}$  – коэффициент учета зависимости величин выбросов от стадии очистки (места объекта в схеме очистки) для стадии заполнения карт, определяемый по таблицам А.2, А.3 [3];  $K_{m2}$  – коэффициент учета зависимости величин выбросов от стадии очистки (места объекта в схеме очистки) для стадии хранения осадка, определяемый по таблицам А.2, А.3 [3];  $F$ ,  $K_y$ ,  $C_{imax}$ ,  $m_i$  – то же, что и в формуле (5).

Максимальный выброс  $i$ -того загрязняющего вещества от полей фильтрации рассчитывается согласно [3, формула (10)]:

$$M_i = 2,905 \cdot F \cdot 0,03 \cdot K_M \cdot \frac{290}{\sqrt{m_i}} \cdot 10^{-7}, \text{ г/с}, \quad (7)$$

где  $F$ ,  $m_i$  – то же, что и в формуле (5);  $K_M$  – коэффициент учета зависимости величин выбросов от стадии очистки (места объекта в схеме очистки), принимается равным значениям этого коэффициента для объектов очистных сооружений, от которых стоки поступают на поля фильтрации, определяемый по таблицам А.2, А.3 [3].

В общем случае валовой выброс загрязняющего вещества рассчитывается согласно [3, формула (5)]:

$$G_i = 6,916 \cdot F \cdot K_y \cdot C_{icp} \cdot K_m \cdot \frac{290}{\sqrt{m_i}} \cdot \tau \cdot 10^{-10}, \text{т/год}, \quad (8)$$

где 6,916 – коэффициент преобразования, рассчитан для скорости ветра 2,2 м/с на высоте 1,5 м от поверхности воды или перекрытия;  $F, K_y, K_m, m_i$  – то же, что и в формуле (5);  $C_{icp}$  – среднее значение равновесной концентрации загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях (температура 0 °С, давление 101,3 кПа), определяемое по таблицам Б.1, Б.2 [3], либо рассчитываемое по пп.5.2.1, 5.2.2 [3];  $\tau$  – время эксплуатации объекта очистного сооружения, ч/год. Для объектов очистных сооружений, у которых поверхность испарения покрыта льдом в холодное время года, время эксплуатации уменьшают на величину, равную продолжительности нахождения льда на поверхности испарения, ч/год.

Валовой выброс  $i$ -того загрязняющего вещества от песковых и иловых площадок рассчитывается согласно [3, формула (9)]:

$$G_i = 6,916 \cdot K_y \cdot C_{icp} \cdot [K_{m1} \cdot (48 \cdot \frac{V_m}{0,2} + 24 \cdot \frac{V_x}{0,2}) + K_{m2} \cdot (F \cdot \tau - 48 \cdot \frac{V_m}{0,2} - 24 \cdot \frac{V_x}{0,2})] \cdot \frac{280}{\sqrt{m_i}} \cdot 10^{-10}, \text{т/год}, \quad (9)$$

где  $F, K_y, m_i$  – то же, что и в формуле (5);  $C_{icp}, \tau$  – то же, что и в формуле (8);  $K_{m1}, K_{m2}$  – то же, что и в формуле (6);  $V_m$  – объём поступившего на площадки осадка за тёплый период года, м<sup>2</sup>;  $V_x$  – объём поступившего на площадки осадка за холодный период года, м<sup>2</sup>.

Валовой выброс  $i$ -того загрязняющего вещества от полей фильтрации рассчитывается согласно [3, формула (11)]:

$$G_i = 6,916 \cdot F \cdot C_{icp} \cdot 0,015 \cdot K_m \cdot \frac{280}{\sqrt{m_i}} \cdot \tau \cdot 10^{-10}, \text{т/год}, \quad (10)$$

где  $F, m_i$  – то же, что и в формуле (5);  $C_{icp}$  – то же, что и в формуле (8);  $K_m$  – то же, что и в формуле (7).

Нами рассматривались два объекта очистных сооружений нефтебазы – станция биологической очистки (СБО) и иловые площадки. Для сравнения, для этих объектов было произведено определение максимальных и валовых выбросов аммиака (код 0303 согласно [4]) и сероводорода [код 0333 согласно (4)] инструментально-расчетным методом, изложенным в [2] и расчетным методом согласно [3]. В обоих вариантах расчета рассматривался один режим эксплуатации и одинаковые другие параметры данных объектов. Результаты расчетов представлены в таблице.

Как видно из таблицы, значения выбросов загрязняющих веществ, полученные более точным инструментально-расчетным методом для сероводорода, являющегося веществом 2 класса опасности, в несколько раз меньше, чем значения, полученные расчетным методом. Это объясняется тем, что в расчетном методе используются справочные значения величин, являющиеся максимально возможными при эксплуатации объектов данного типа с максимальной нагрузкой. В то время как при применении инструментально-расчетного метода используются реальные значения концентраций загрязняющих веществ, полученные путем их инструментальных замеров в атмосферном воздухе непосредственно возле этих объектов в действующем режиме работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование инструментально-расчетных методов, приведенных в [2] для определения максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ от объектов очистных сооружений повышает точность их определения. Вместе с тем, на наш взгляд, проведение инструментальных измерений на горизонтальных поверхностях выделения проточного типа с учетом фактора «благоприятного направления ветра» не приводит к сколь-нибудь заметному отличию в полученных результатах, а лишь усложняет данную методику [2]. Заметим также, что термин «благоприятное направление ветра» отсутствует в [5] и других нормативных документах. Кроме

Таблица 1 – Значения выбросов аммиака (код 0303) и сероводорода (код 0333) от объектов очистных сооружений

№	Наименование объекта	Загрязняющее вещество	Инструментально-расчетный метод [2]		Расчетный метод [3]	
			$M_i$ , г/с	$G_i$ , т/г	$M_i$ , г/с	$G_i$ , т/г
1	Станция биологической очистки	аммиак	0,0113	0,3550	0,0119	0,3096
		сероводород	0,0005	0,0157	0,0075	0,2131
2	Иловые площадки	аммиак	0,0178	0,5617	0,0379	0,6263
		сероводород	0,0010	0,0318	0,0303	0,4996

того, необходимо учесть, что наибольшие значения максимальных выбросов, определяемые по методике [2], могут быть определены с использованием инструментальных значений, полученных в наиболее теплый период года. Таким образом, инструментально-расчетные значения валовых выбросов загрязняющих веществ также

будут наибольшими при использовании инструментальных значений, полученных в наиболее теплый период года и могут быть скорректированы в сторону уменьшения с учетом проведения дополнительных инструментальных измерений в различные климатические периоды года.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инструкция о порядке инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух: утв. Пост. Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ от 23 июня 2009 г. № 42. – Минск: Минприроды, 2009. – 34 с.
2. ТКП17.08-16-2011 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух / Порядок определения выбросов от объектов предприятий нефтехимической отрасли. Минск: Минприроды, 2012. – 37 с.
3. П-ООС 17.08-01-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух / Правила расчета выбросов от объектов очистных сооружений. Минск: «Экологияинвест», 2012. – 21 с.

#### REFERENCES

1. The instruction about an order of inventory of emissions of the polluting substances in atmospheric air [Instrukcija o porjadke inventarizacii vybrosov zagrjaznjajushhij veshhestv v atmosferynyj vozduh]: it is approved as the Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of Republic of Belarus of June 23, 2009 No. 42.– Minsk: Ministry for Protection of the Environment and Natural Resources, 2009. – 34 pages.
2. ТКП17.08-16-2011 (02120). Environmental protection and environmental management. Atmosphere. Emissions of polluting substances in an atmospheric air / Order of definition of emissions from objects of the enterprises of petrochemical branch [Ohrana okruzhajushhej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosfera. Vybrosy zagrjaznjajushhij veshhestv v atmosferynyj vozduh / Porjadok opredelenija vybrosov

4. СТБ 17.08.02-01-2009. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух/ Вещества, загрязняющие атмосферный воздух. Коды и перечень. – Введ. 01.07.2009. – Минск: Госстандарт.- 2009. – 195 с.
5. СТБ 17.01.01-01-2012. Охрана окружающей среды и природопользование / Основные термины и определения. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт. – 2012. – 69 с.
3. P-OOS 17.08-01-2012 (02120). Environmental protection and environmental management. Atmospheric air. Emissions of polluting substances in atmospheric air / Rules of calculation of emissions from objects of treatment facilities [Ohrana okruzhajushhej sredy i prirodopol'zovanie. Atmo-sfernyj vozduh. Vybrosty zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosferyj vozduh / Pravila rascheta vybrosov ot ob#ektov ochistnyh sooruzhenij]. Minsk: "Ekologiyainvest", 2012. – 21 pages.
4. STB 17.08.02-01-2009. Environmental protection and environmental management. Atmospheric the air / Substances polluting atmospheric air [Ohrana okruzhajushhej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosfernyj vozduh/ Veshhestva, zagrijaznjajushhie atmosferyj vozduh. Kody i perechen]. Codes and list. – valid 01.07.2009. – Minsk: Gosstandart.- 2009. – 195 pages.
5. STB 17.01.01-01-2012. Environmental protection and environmental management / Main terms and definitions [Ohrana okruzhajushhej sredy i prirodopol'zovanie / Osnovnye terminy i opredelenija]. – valid 01.01.2013. – Minsk: Gosstandart. – 2012. – 69 pages.

*Статья поступила в редакцию 08.09.2014 г.*



**ОЧИСТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД**

Е.И. Семёнова, Н.А. Бублиенко, Т.А. Шилофост

УДК: 628.356; 628.113; 628.543

**РЕФЕРАТ**

*НЕФТЕСОДЕРЖАЩИЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ, АППАРАТ С ПЕННЫМИ СЛОЯМИ, АЭРОТЕНК-ОСВЕТИТЕЛЬ, БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА*

*Предмет работы – сточные воды, содержащие нефтепродукты. Тема работы – биодеструкция нефтепродуктов, содержащихся в сточных водах. Цель работы – исследование процесса биодеструкции нефтепродуктов в сточных водах двумя способами. Определены основные показатели данных вод и их пригодность к биохимической очистке, а именно концентрация нефтепродуктов – 80 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – 300 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>, БПК<sub>5</sub> – 130 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>. Проведена интенсификация процесса биохимической очистки с помощью блока биохимической очистки, который состоит из аппарата с пенными слоями и аэротенка-осветлителя. Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью блока биохимической очистки производилась в большей степени за счет биосорбционных процессов, которые проходят в аппарате с пенными слоями, и дальнейшая очистка в аэротенке-осветлителе. В результате проведенных опытов эффективность очистки по нефтепродуктам составила 98,5 %, по ХПК – 93,3 %, по БПК<sub>5</sub> – 87,0 %. Данное оборудование может быть применено на заводах пищевой промышленности, а также на судах и предприятиях других отраслей промышленности.*

**ABSTRACT**

*OILWASTEWATER, APPARATUS WITH FOAM LAYERS, AIRTANK-CLARIFIER, BIOCHEMICAL PURIFICATION*

*The given article discusses the problem of purification of oil wastewater. It provides the information of pollution of oil wastewater which is produced by the food enterprise, and also the ways of its purification.. The most effective way to dispose dissolved and digestible fractions of oil products is biological wastewater purification. The process of oil wastewater purification by airtank-mixer has been researched. The intensification of the process of purification by the block of biochemical oxidation has been conducted, which includes the apparatus with foam layers and an airtank-clarifier. The scientific novelty of the research lies in biosorption of oil gas-liquid countercurrent mode and oxidation in an airtank-clarifier.*

Влияние антропогенных факторов на биосферу Земли привело к возникновению нежелательных негативных явлений, что способствует деградации экосистем и глобальному экологическому кризису [7].

Вода – один из самых важных компонентов окружающей природной среды. Она постоянно взаимодействует с земельными, лесными ресурсами, с атмосферным воздухом и влияет на их качество.

Одной из категорий стоков, которые загрязняют водоемы, являются нефтесодержащие

сточные воды, образующиеся на судах и практически на всех предприятиях народного хозяйства. На каждом предприятии в результате мойки автомобильных цистерн, оборудования, попадания технических масел в воду образуются нефтесодержащие сточные воды. На сегодня очистка данных стоков производится, в основном, путем отстаивания и методом флотации. Так как нефтепродукты в сточных водах находятся в растворённом виде или в эмульгированном состоянии, это не позволяет в полной мере решить проблему удаления этих загрязнений из

них за счет механических и физико-химических методов. С этой целью для выполнения требований стандарта по качеству воды необходимо разрабатывать другие способы очистки сточных вод от всех фракций загрязнений, и наиболее перспективным из них является биохимическая очистка [1].

Загрязняющие вещества нефтесодержащих стоков отличаются от загрязнений бытовых сточных вод, так как содержат более тяжелоокисляемые компоненты. Такие сточные воды нуждаются в особом подходе к способу их очистки, а также к составу очистных сооружений для удаления вышеуказанных загрязнений, особенно это касается использования способа биохимической очистки [2, 4].

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование эффективности работы компактной установки (с аппаратом с пенными слоями) в сравнении с работой аэротенка-смесителя при очистке нефтесодержащих сточных вод.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводили параллельно на двух лабораторных установках (аэротенк-смеситель и компактная установка). Процесс происходил в непрерывном режиме. Для поддержания постоянной концентрации активного ила в очистных сооружениях проводили его рециркуляцию.

В процессе исследования определялись показатели загрязненности по ХПК и БПК<sub>5</sub>, концентрации нефтепродуктов, взвешенных веществ, азота аммонийных солей, нитратов, нитритов; pH; эффективность очистки. Для определения основных показателей процесса очистки были использованы стандартные методики [3].

Нами были определены основные показатели загрязненности нефтесодержащих сточных вод, которые показали, что данные стоки пригодны для биохимической очистки, а именно: концентрация нефтепродуктов – 80 мг/дм<sup>3</sup>, БПК<sub>5</sub> – 130 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>, ХПК – 300 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>, взвешенные вещества – 125 мг/дм<sup>3</sup>, pH 6,9, азот аммонийных солей – 36 мг/дм<sup>3</sup>, нитриты – 0,30 мг/дм<sup>3</sup>, нитраты – 0,25 мг/дм<sup>3</sup>.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс аэробной очистки нефтесодержащих сточных вод проводили на лабораторном аэротенке-смесителе, включающем аэротенк и отстойник в одном блоке.

Устройство выполнено в виде сооружения цилиндрической формы с коническим днищем, перегородка разделяет устройство на аэротенк и отстойник, что позволяет обеспечить компактность установки. Устройство снабжено системой циркуляции активного ила в виде расположенной соосно в центре емкости трубы, которая направляет активный ил из аэротенка в отстойник, что позволяет исключить дополнительные коммуникации для подачи сточных вод и активного ила в отстойник, и обеспечивает дополнительную компактность устройства. Трубопроводы циркуляционного активного ила и сжатого воздуха позволяют осуществлять непрерывный возврат ила в аэротенк, поддерживая в нем оптимальную концентрацию ила. Кроме того, все вышеперечисленное позволяет повысить эффективность очистки сточных вод [5].

В ходе непрерывной работы установки концентрация по БПК<sub>5</sub> снижалась с 130 до 40 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>, то есть на 69 %, что свидетельствует об эффекте неполной биохимической очистки. Загрязненность по ХПК снижалась с 300 до 69 мг O<sub>2</sub> / дм<sup>3</sup>, эффективность очистки по ХПК – 77 %.

Хотя эффект очистки по БПК<sub>5</sub> и ХПК не отвечал параметрам процесса полной биохимической очистки, эффективность удаления нефтепродуктов оказалась достаточно высокой.

Следует отметить, что ввиду малой доли легкоокисляемых веществ в смеси загрязнений нефтесодержащих сточных вод прирост активного ила по концентрации сухой массы отнюдь не означает, что речь идет о биомассе в абсолютном количественном выражении. Прирост ила в данном случае отражает скорее накопление на живой массе трудноокисляемых веществ, сорбированных хлопьями ила, в частности, нефтепродуктов. Поэтому для характеристики кинетики и расчетных параметров процесса прироста ила в данном случае непригодны такие величины, как удельный прирост ила, рассчитываемый на единицу количества снятого БПК<sub>5</sub>. Имеет смысл ограничиться величиной относительного суточного прироста ила, рассчитываемой в про-

центрах по отношению к исходной его концентрации.

Повышение эффективности удаления загрязнений, измеряемых по нефтепродуктам, в ходе роста биомассы свидетельствует о наличии сорбционных процессов, за счет которых активный ил изымает трудноокисляемые эмульгированные и грубодисперсные примеси.

Следовательно, совершенствование аппаратного оформления с целью интенсификации процесса биохимической очистки нефтесодержащих сточных вод должно предусматривать максимальное использование сорбционных свойств активного ила. Это нашло выражение в использовании устройства с газожидкостным противотоком в компактной установке, которая представлена на рисунке 1. Этот блок состоит из аппарата с пенными слоями и аэротенка-осветлителя.

Аппарат с пенными слоями представляет собой вертикально скомпонованную батарею ячеек смешения, соединенных последовательно. В нем преобладает процесс биосорбции, то есть переход значительной части загрязнений из фаз коллоидов, мелкодиспергированных взвесей и частично молекулярных растворов в фазу активного ила.

В пенных слоях происходит интенсивное перемешивание жидкой фазы, что, в свою очередь, способствует интенсификации процесса биосорбции. На омываемых жидкостью и воздухом нижних поверхностях перегородок и стенках аппарата с пенными слоями образуется слой биопленки, что способствует также дополнительной интенсификации процесса биосорбции и, следовательно, процесса изъятия загрязнений в целом [6].

Иловодяная смесь, насыщенная кислородом в аппарате с пенными слоями, требует меньшего времени пребывания в аэротенке-осветлителе. Такое сочетание устройств обеспечивает высокий эффект очистки сточных вод.

Результаты исследования процесса очистки нефтесодержащих сточных вод в аэротенке-смесителе и в блоке биохимической очистки представлены на рисунках 2, 3, 4.

Результаты, представленные на рисунках 2, 3, 4, свидетельствуют об экспериментальном подтверждении положительного влияния аппарата с

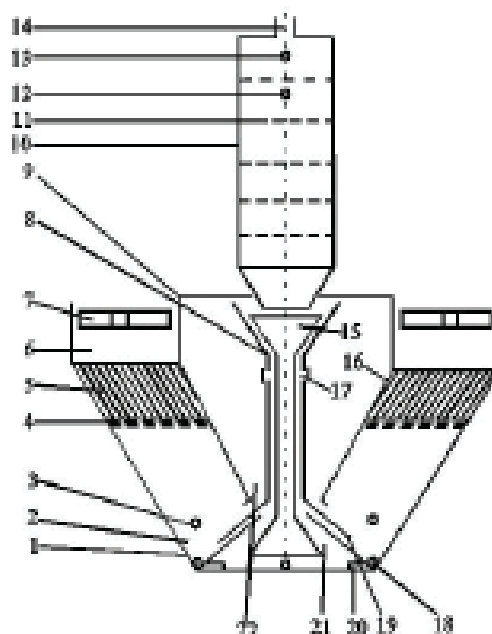


Рисунок 1 – Схема блока биохимической очистки: 1 – корпус; 2 – зона зависшего слоя; 3 – выпуск циркулирующего активного ила; 4 – сетка-электрод; 5 – ламинаторы; 6 – защитная зона; 7 – сборные лотки, выход очищенной воды; 8 – перегородка; 9 – перекрытие; 10 – корпус аппарата с пенными слоями; 11 – тарелки; 12 – впуск циркулирующего ила; 13 – впуск сточной воды; 14 – выпуск воздуха; 15 – направляющая колонка; 16 – перегородка; 17 – переливные окна с шиберами; 18 – система выпуска; 19 – «зубы»; 20 – аэраторы; 21 – зона аэрации; 22 – зона дегазации

пенными слоями на процесс извлечения нефтепродуктов. Так, эффективность извлечения нефтепродуктов увеличилась с 93,2 % до 98,5 %, что, по нашему мнению, обуславливается процессом биосорбции, протекающим в пенных слоях. Кроме того, скорость изъятия по нефтепродуктам увеличилась с 15,58 мг/(г·час) до 25,25 мг/(г·час).

Аппарат с пенными слоями функционирует как узел для прохождения процесса насыщения сточной воды кислородом и удаления загрязнений с воды активным илом за счет адсорбции. Проведены измерения концентрации кислорода, растворенного в ило-водяной смеси, на разных уровнях высоты аппарата с пенными слоями, а также концентрация загрязнений по БПК<sub>5</sub> в отстоянных пробах, взятых на тех же уровнях. Результаты измерений представлены на рисунке 5.

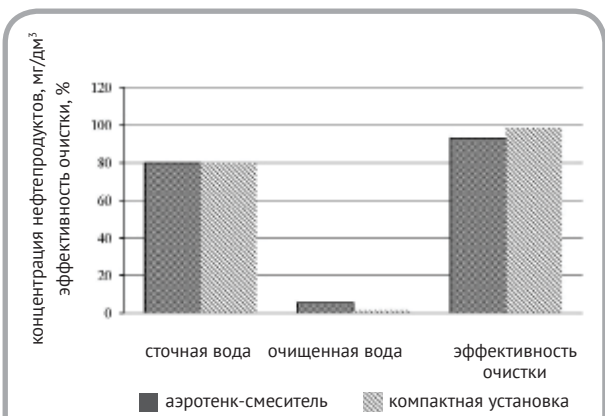


Рисунок 2 – Снижение концентрации нефтепродуктов в сточных водах и эффективность очистки

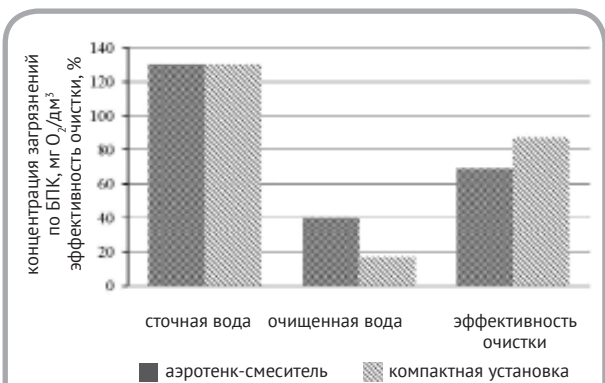


Рисунок 3 – Снижение концентрации загрязнений по BPK5 в сточных водах и эффективность очистки

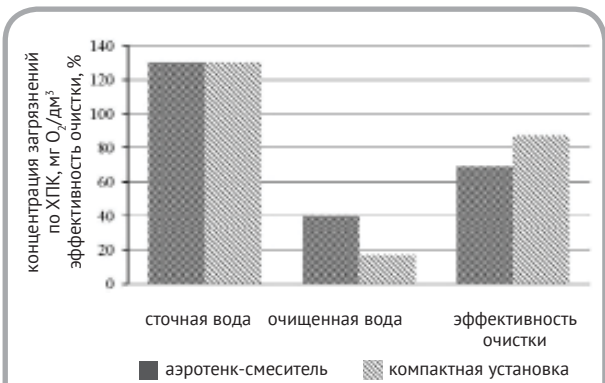


Рисунок 4 – Снижение концентрации загрязнений по XPK в сточных водах и эффективность очистки

Эти результаты показывают, что иловодяная смесь, что выходит с аппарата с пенными слоями

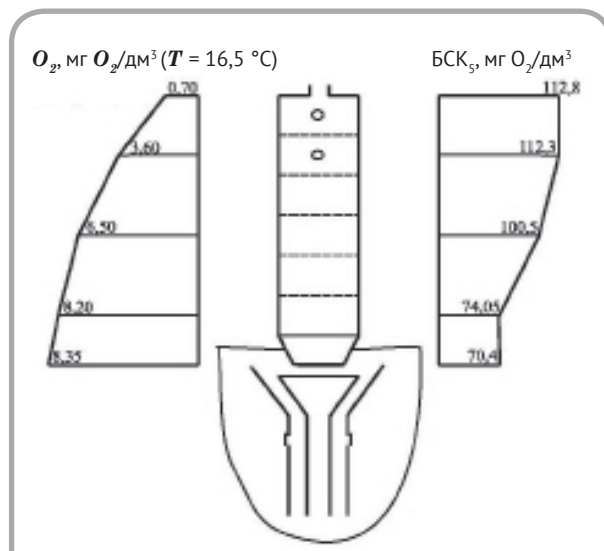


Рисунок 5 – Разделение концентрации кислорода и BPK5 по высоте аппарата с пенными слоями

в аэротенк-осветлитель, практически насыщена кислородом, а загрязнения по BPK5 в сточной жидкости перемещены частично с жидкой фазы на хлопья ила, что подаются эрлифтом из зоны взвешенного слоя аэротенка-осветлителя в аппарат с пенными слоями. Без сомнений, некоторая часть загрязнений, которые преобладают в растворимой фазе и легко окисляются, используются илом в качестве питательных веществ.

Иловодяная смесь, насыщенная кислородом в аппарате с пенными слоями, нуждается в меньшем времени пребывания в аэротенке-осветлителе, чем достигается высокая эффективность очистки сточной жидкости при меньшем времени её обработки в аэротенке данного типа.

Взвешенный слой ила в аэротенке-осветлителе служит не только зоной раздела ило-водяной смеси, но и реактором окисления. Зона размещения ламинаризаторов (над взвешенным слоем) обеспечивает, с одной стороны, повышение эффективности осветления очищенной воды, а с другой – и это главное её предназначение – стабилизирует работу установки при динамических нарушениях.

В аппарате с пенными слоями на тарелках образуется пенный слой. Условия газо-жидкостного противотока обеспечивает измельчение жидкости на капли в междутарелочном пространстве и, таким образом, развитую поверхность контактирования жидкости и кислорода воздуха. Такие условия контактирования очень благоприятны

для биосорбции эмульгированных нефтепродуктов активным илом.

Сравнение технико-экономических показателей обеих установок должно быть проведено при равных качественных показателях, доочистка сточных вод в варианте с аэротенком-смесителем не предусматривалась. Тем не менее, необходимо учесть, что качество очищенной воды в варианте с аппаратом с пенными слоями по содержанию нефтепродуктов значительно лучше, чем в первом варианте, и это является несомненным техническим преимуществом компактной установки (с аппаратом с пенными слоями).

Годовой экономический эффект при работе блока биохимической очистки был рассчитан по формуле

$$\mathcal{E}_{год} = (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2),$$

где  $C$  и  $K$  – эксплуатационные и капитальные затраты,  $E$  – нормативный коэффициент окупаемости, равный 0,15.

$$\mathcal{E}_{год} = (2150 + 0,15 \cdot 3970) - (985 + 0,15 \cdot 1760) = 1496,5 \text{ (грн/год)}.$$

Эргономические характеристики компактной установки (блока биохимической очистки) выражаются в удобстве работы эксплуатационного персонала. Точнее, эргономические достоинства рассматриваются с точки зрения оценки трех

поддающихся измерению величин: а) времени, затрачиваемого на операции по управлению работы установок; б) объема движений, необходимых при совершении операций; в) характера и протяженности движений.

Расчеты сведены в таблице 1.

По результатам проведенных исследований и расчетов можно сделать выводы, что компактная установка, которая состоит с аэротенка-осветителя и аппарата с пенными слоями, дает положительный эффект не только по очистке сточных вод от нефтепродуктов, а также будет иметь экономический эффект при её внедрении. Поэтому компактную установку можно рекомендовать для очистки сточных вод от нефтепродуктов на пищевых и промышленных предприятиях, а также для очистки судовых сточных вод.

## ВЫВОДЫ

Подобрано оборудование и такие параметры его работы, при которых достигается высокая степень очистки стоков от нефтепродуктов (до 98,5 %). Результаты подтверждают, что извлечение нефтепродуктов биосорбцией в пенных слоях положительно влияет на процесс очистки сточной воды по всем показателям. Эта разработка имеет значительный социально-экологический эффект, так как позволяет значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Таблица 1 – Сводные результаты расчета ожидаемой экономической эффективности от внедрения очистной компактной установки (с аппаратом с пенными слоями)

Показатели	Единица измерения	Очистные установки	
		аэротенк-смеситель	компактная установка
Годовая производительность установок	м <sup>3</sup> /год	73000	73000
Себестоимость очистки сточных вод	коп./м <sup>3</sup>	9,52	4,35
Удельные капиталовложения на сооружение очистных установок	грн./м <sup>3</sup> год	0,126	0,078
Дополнительная прибыль за счет снижения себестоимости	грн.	-	1170
Срок окупаемости	годы	6,7	6,7
Высвобождение численности эксплуатационного персонала	чел.	-	2
Объем затрат	тыс. грн.	3970	1760
Годовой экономический эффект от внедрения компактной установки на очистной станции производительностью 200 м <sup>3</sup> /сут.	грн./год	-	1496,5

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долина, Л.Ф. (2005), *Современная технология и сооружения для очистки нефтесодержащих сточных вод*, Континент, 140 с.
2. Жмур, Н.С. (2003), *Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками*, Москва, Акварос, 512 с.
3. Муравьев, А.Г. (2004), *Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами*, Санкт-Петербург, Крисмас, 248 с.
4. Семенова, О.І., Бублиенко, Н.О., Ткаченко, Т.Л. (2012), Очищення стічних вод, що містять нафтопродукти, *Наукові праці НУХТ*, 2012, № 42, С. 53 – 60.
5. Патент України на винахід 21309А, МПК С02F3/12. Пристрій для аеробної очистки стічних вод / Нікітін Г.О., Пилипко Ю.С., Левітіна Н.В., Семенова О.І.; заявник і власник Український державний університет харчових технологій. – № 97063359; заявл. 27.06.97; опубл. 30.04.98, Бюл. 2.
6. Пат. 75309 Україна, МПК С02F 11/02 (2006.01). Аеротенк-прояснювач / Семенова О.І., Ткаченко Т.Л., Бублиенко Н.О., Шилофост Т.О.; власник Національний університет харчових технологій. – № у 2012 06205; заявл. 23.05.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. № 22.
7. Biochemical purification of oil wastewater / Semenova O., Bublikenko N., Smirnova J., Shylofost T. // «Aktualne problem nowoczesnych nauk-2012»: Materiały VIII międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7 – 15.06.2012. – Vol. 40. – Przemysl: 2012. – P. 29 – 32.

## REFERENCES

1. Dolina, L.F. (2005), *Sovremennaja tehnologija i sooruzhenija dlja ochistki neftesoderzhashhih stochnyh vod* [Modern technology and facilities for oil wastewater], Dnepropetrovsk, Kontinent, 140 p.
2. Zhmur, N.S. (2003), *Tehnologicheskie i biohimicheskie processy ochistki stochnyh vod na sooruzhenijah s ajerotenkami* [Technological and biochemical processes at wastewater treatment plants with aeration tanks], Moscow, Akvaros, 512 p.
3. Murav'ev, A.G. (2004), *Rukovodstvo po opredeleniju pokazatelej kachestva vody polevymi metodami* [Guidelines for the determination of water quality field methods], St. Petersburg, Krimas, 248 p.
4. Semenova, O.I., Bublikenko, N.O., Tkachenko T.L. (2012), The purification of oil wastewater [Ochyshhennja stichnyh vod, shho mistjat' naftoprodukty], *Naukovi praci NUHT – Proceedings NUFT* (42), pp. 53 – 60.
5. Ukraine for invention patent [Patent Ukrainy na vynahid] 21309, МПК S02F3/12. An apparatus for aerobic sewage treatment [Prystrij dlja aerobnoi' ochystky stichnyh vod ]/ Nikitin G.O., Pylypko Y.S., Levitin N.V. Semenova O.I.; applicant and owner of Ukrainian State University of Food Technologies. - № 97063359; appl. 27.06.97; publ. 04.30.98, Bull. 2.
6. Pat. 75309 Ukraine, IPC S02F 11/02 (2006.01). Aerotank-clarifier [Aerotenk-projasnjuvach] Semenova O.I. Tkachenko T.L., Bublikenko N.A., Shylofost T.A.; owner of the National University of Food Technologies [vlasnyk Nacional'nyj universytet harchovyh tehnologij] № u 2012 06205; appl. 23.05.2012; publ. 26/11/2012, Bull. Number 22.

7. Biochemical purification of oil wastewater / Semenova O., Bubljenko N., Smirnova J., Shylofost T. // «Aktualne problem nowoczesnych nauk-2012»: Materiały VIII międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7 – 15.06.2012. – Vol. 40. – Przemysł: 2012. – P. 29 – 32.

*Статья поступила в редакцию 12.06.2014 г.*

## ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КАВИТАЦИИ

Т.Я. Царюк, В.Н. Сакевич, И.П. Фалюшина,  
В.В. Ажаронак, Е.С. Посканная

УДК 666.97.001.015:[53.09+53.06] 620.197

### РЕФЕРАТ

*КАВИТАЦИЯ, ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ОЛЕИНОВАЯ КИСЛОТА, ЧАСТОТА, УЛЬТРАЗВУК, РЕФРАКЦИЯ, КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ, ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ*

*Исследованы изменения свойств растворов технической олеиновой кислоты (ОК) в минеральном масле И-20 А в концентрации 10 % мас. после воздействия высокочастотного магнитного поля и кавитации на ОК. Установлено, что воздействие магнитного поля и кавитации на защитные свойства растворов ОК в условиях воздействия сернистого ангидрида и электролита неоднозначно. Свойства зависят не только от режима обработки ОК магнитным полем или кавитационным воздействием, но и от типа коррозионной среды. Исследованы изменения краевого угла смачивания лежащей капли на отшлифованной поверхности пластины из стали по проекции капли на экран после воздействия кавитации и магнитного поля на ОК. Показано, что магнитное поле, в отличие от кавитационной обработки, практически не изменяет эту характеристику ОК, а наиболее заметные изменения смачивающей способности происходят при использовании кавитационной обработки с термостатированием. Отмечено, что отсутствие ясного физического понимания механизмов воздействия на свойства различных композиций как высокочастотного магнитного поля, так и кавитации не позволяет сделать однозначных выводов об эффективности того или иного воздействия и требует дальнейших систематических экспериментальных исследований.*

### ABSTRACT

*CAVITATION, RFH FIELD, OLEINIC ACID, FREQUENCY, ULTRASOUND, REFRACTION, INTERFACIAL ANGLE, THERMOSTATTING*

*The article is aimed at finding regularities in the change of oleinic acid's properties as a result RFH field's influence and cavitation.*

*It is established that the protective properties of the solutions of oleinic acid in the conditions of influence of sulphurous anhydride and electrolyte depend not only on the processing mode of its RFH field or cavitation influence, but also on type of the corrosion environment. It is shown that the RFH field in contrast to cavitation processing practically doesn't change an interfacial angle of oleinic acid, and the most noticeable changes of the wettability occur by using cavitation processing with thermostating. It is noted that the lack of a clear physical understanding of the mechanisms of influence on the properties of the various compositions both RFH field and cavitation doesn't allow to predict efficiency of any influence and demands further systematic experimental studies.*

Основным средством временной противокоррозионной защиты металлоизделий при их производстве, транспортировании и хранении являются консервационные масла, смазки и защитные тонкопленочные покрытия. Эти матери-

алы, как правило, представляют собой нефтяные дисперсные системы (НДС), состоящие из базового масла и присадок различного функционального назначения: вытесняющих, моющих, защитных, антиокислительных, диспергирующих и др.



Для обеспечения требуемого уровня защитных свойств в состав консервационных материалов вводят ингибиторы коррозии – маслорастворимые поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые представляют собой органические соединения, содержащие в молекуле углеводородный радикал, обеспечивающий их растворимость в минеральном масле, и одну или несколько функциональных групп (кислород-, азот-, серо-, фосфор- и др. группы), которые за счет адсорбционно-хемосорбционного взаимодействия с анодными или (и) катодными участками металла образуют на его поверхности защитную пленку [1, 2]. Наибольшее распространение в качестве маслорастворимых ингибиторов коррозии нашли кислородсодержащие органические соединения, в том числе и жирные кислоты, как синтетические, так и полученные в результате переработки растительных масел и технических жиров, в частности олеиновая кислота.

Защитная эффективность маслорастворимых ингибиторов коррозии обуславливается, прежде всего, наличием активных структурных элементов – функциональных групп, способных к адсорбционно-хемосорбционному взаимодействию с поверхностью металла. Известно, что в результате межмолекулярных взаимодействий в НДС образуются различного рода структуры: ассоциаты, мицеллы, надмицеллярные образования, жидко- и твердокристаллические структуры. Авторами [3] показано, что в случае ингибиторов адсорбционно-хемосорбционного типа действия для обеспечения требуемого уровня функциональных свойств должно быть оптимальное соотношение между содержанием активных структурных элементов и молекулярной жесткостью коллоидных систем.

В последнее время все для регулирования свойств НДС более широкое применение находят физические методы, среди которых следует отметить ультразвуковое воздействие и наложение магнитных полей [4–7]. Например, использование ультразвуковой обработки позволяет увеличить выход газа, бензиновой фракции и фракций до 350 °С в ~ 1,5 раза. Установлено, что кроме диспергирующего эффекта, ультразвуковое воздействие приводит к изменению группового состава – увеличению содержания смолисто-асфальтовых веществ и снижению

парафино-нафтенных и ароматических углеводородов. Также показано изменение полидисперсного распределения частиц по размерам со сдвигом максимума кривой в область меньших размеров. Считается, что в результате ультразвуковой обработки происходит изменение качественного и количественного состояния надмолекулярных структур НДС. Под влиянием магнитного поля в НДС происходят аналогичные процессы, например, показано [6], что под влиянием магнитного поля в динамическом режиме происходит повышение парамагнитной активности НДС до 60 %, также свидетельствующее об увеличении ее степени дисперсности.

В связи с этим была исследована возможность повышения защитной эффективности побочных продуктов масложировой промышленности с помощью вышеперечисленных методов.

Цель работы – установление закономерностей изменения свойств олеиновой кислоты в результате воздействия высокочастотного магнитного поля и кавитации.

Объектом исследования являлась техническая олеиновая кислота (ОК) и её растворы в минеральном масле И-20 А в концентрации 10 % мас. Исследуемый образец ОК содержал 99,0 % жирных кислот и имел следующие физико-химические показатели: кислотное число – 199,7 мгКОН/г, йодное число – 97,1 гI<sub>2</sub>/100 г, число омыления – 201,0 мгКОН/г, температура застывания – 6 °С.

Обработка ОК проводилась высокочастотным магнитным полем (частота 5,28 МГц) в течение 1, 2, 4, 8, 16 и 32 минут. Кавитационное воздействие на ОК осуществлялось мощным ультразвуком на частоте 22 кГц и с амплитудой колебаний торца волновода 45 мкм без термостатирования и с термостатированием в течение 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мин [8].

При исследовании использовали как стандартные, так и лабораторные методы. Защитные свойства 10 % растворов ОК определяли методами ускоренных испытаний по ГОСТ 9.054 при воздействии повышенной влажности, температуры и сернистого ангидрида с периодической конденсацией влаги; при постоянном погружении в электролит (искусственную морскую воду). Испытания в сернистом ангидриде проводят циклами, которые состоят из двух частей: в пер-

вой части металлические пластины, покрытые исследуемыми образцами, подвергаются воздействию сернистого ангидрида в концентрации 0,015 % объемных при температуре  $40 \pm 2$  оС и относительной влажности воздуха 95 – 100 % в течение 7 часов; во второй – создают условия конденсации влаги на образцах их охлаждением путем выключения нагрева камеры. Продолжительность – 17 часов. Критерием оценки защитной эффективности объектов служила потеря массы пластины из стали 10, определяемая гравиметрическим методом после удаления продуктов коррозии, при этом отклонения параллельных измерений от среднеарифметического значения составляли не более 5 %.

Рефрактометрические измерения показателя преломления (рефракции)  $n$  вещества проводились на рефрактометре ИРФ-22 (ошибка измерений – 0,0002), после чего рассчитывалось отклонение коэффициентов рефракции  $n_{обр}$  обработанной ОК от коэффициента рефракции  $n_{необр}$  необработанной ОК. Краевой угол смачивания определяли методом лежащей капли на отшлифованной поверхности пластины из стали по проекции капли на экран.

Результаты оценки влияния высокочастотного магнитного поля и ультразвука на защитные свойства ОК представлены на рисунках 1–3.

Установлено, что воздействие магнитного

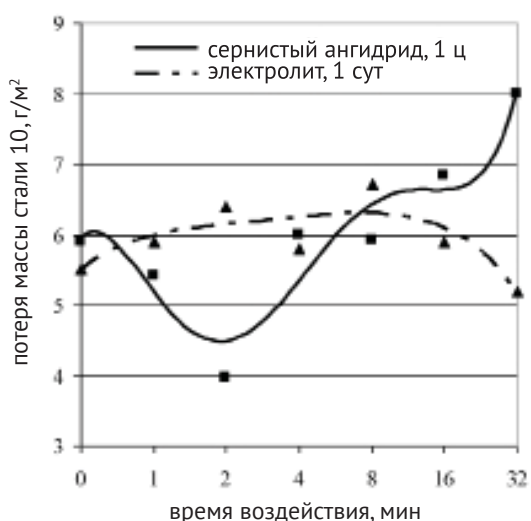


Рисунок 1 – Влияние времени обработки магнитным полем ОК на защитные свойства ее 10 % растворов

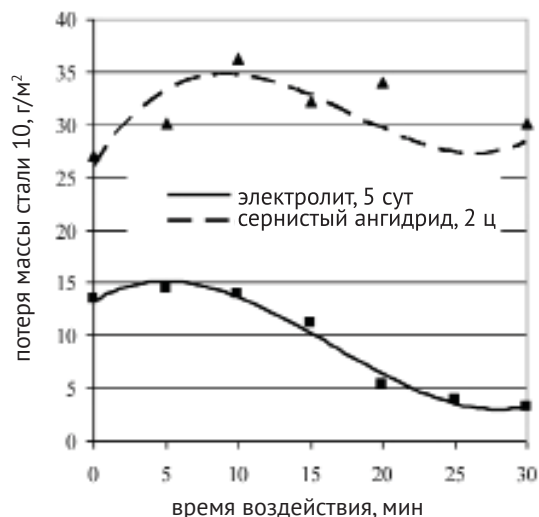


Рисунок 2 – Влияние УЗК без термостатирования на защитные свойства 10 % растворов ОК в электролите

поля на защитные свойства ОК неоднозначно (рис. 1). В условиях сернистого ангидрида зависимость защитных свойств растворов ОК от времени ее обработки носит экстремальный характер: при воздействии поля в течение 2 мин наблюдается повышение эффективности ОК на 30 %, однако дальнейшее увеличение времени обработки магнитным полем не только не улучшает защитные характеристики ОК, но после 30

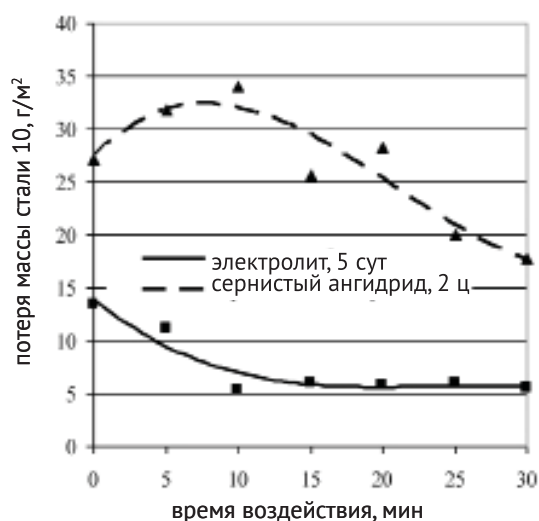


Рисунок 3 – Влияние УЗК с термостатированием на защитные свойства 10 % растворов ОК в сернистом ангидриде

мин воздействия приводит к снижению уровня ее защитных свойств на 35 %. В то же время наложение магнитного поля практически не влияет на защитную эффективность ОК при погружении в электролит.

Влияние кавитации на защитные свойства ОК в условиях воздействия сернистого ангидрида и электролита также неоднозначно и зависит не только от режима обработки ее ультразвуком, но и от типа коррозионной среды (рис. 2, 3).

Так, в результате ультразвуковой обработки ОК без термостатирования имеет место некоторое снижение ее защитной эффективности в сернистом ангидриде, при этом минимальной защитной способностью характеризуются образцы ОК после 10 мин воздействия. В электролите наблюдается несколько иная картина: УЗ обработка ОК до 15 мин не влияет на ее защитную эффективность, однако после 20 мин воздействия происходит повышение защитных свойств ингибитора коррозии в 2,5 – 4 раза (рис. 2).

В случае использования УЗК с термостатированием в течение первых 15 мин также происходит падение защитной эффективности ОК в условиях воздействия сернистого ангидрида приблизительно на 30 %, но при увеличении времени обработки до 25 мин эффективность ОК как ингибитора коррозии повышается в 1,4 раза. При погружении в электролит обработка ОК в течение 10 мин приводит к повышению ее защитных свойств в 2,0 – 2,2 раза, однако дальнейшее увеличение времени воздействия не оказывает влияния на эту характеристику (рис. 3).

Для уточнения изменений, происходящих с ОК при физических воздействиях, был проведен рефрактометрический анализ образцов ОК, который основан на измерении показателя преломления (рефракции)  $n$  вещества [9]. Известно, что показатель преломления вещества  $n$  зависит от его природы, а также от длины волны света и от температуры. Для монохроматического света при постоянной температуре коэффициент рефракции  $n$  среды зависит от химического состава и структуры вещества.

Полученные результаты показали (рис. 4), что при обработке ОК без термостатирования происходит изменение структуры, влияющее на показатели преломления ОК, при этом максимум

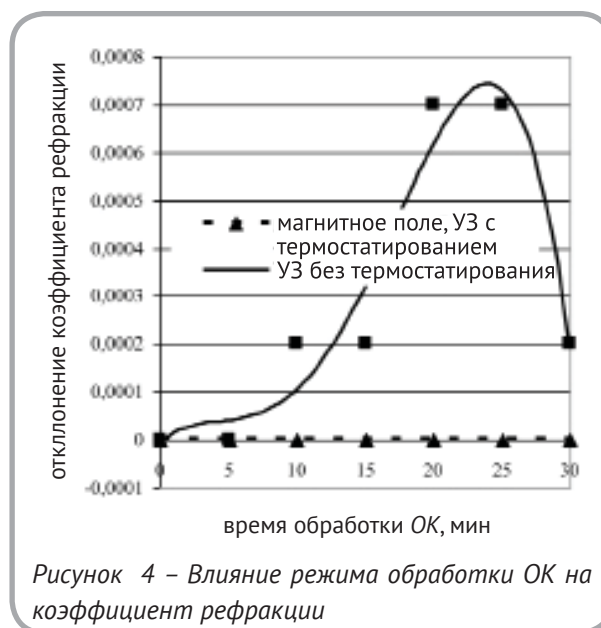
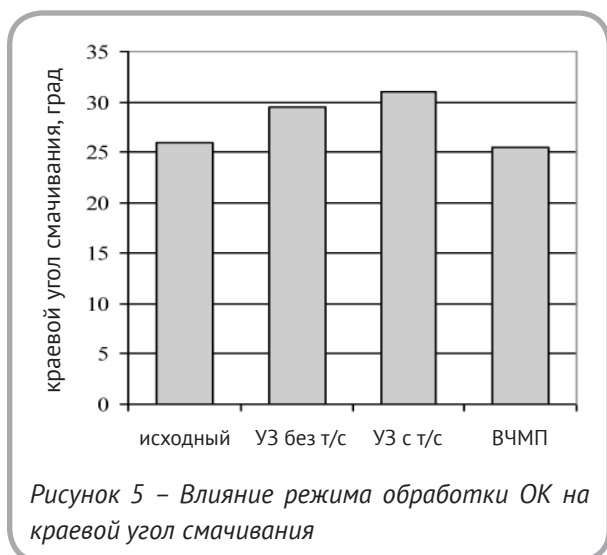


Рисунок 4 – Влияние режима обработки ОК на коэффициент рефракции

отклонения этого коэффициента наблюдается в интервале 20–25 мин. Именно в этом интервале зафиксировано максимальное изменение защитных свойств ОК (рис. 2). Следует отметить, что с помощью рефрактометрического анализа подобное явление при УЗК обработке ОК с термостатированием не обнаружено, хотя также зафиксировано существенное изменение защитной эффективности ОК (рис. 3).

При использовании смазочных материалов большое значение имеет адгезионное взаимодействие с твердыми поверхностями и их смачивание. Смачивание – это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твёрдого тела, которое характеризуется краевым углом смачивания. Результаты оценки влияния воздействия в течение 10 мин ультразвука и магнитного поля на ОК на краевой угол смачивания, представленные на рисунке 5, показали, что магнитное поле, в отличие от ультразвуковой обработки, практически не изменяет эту характеристику ОК, а наиболее заметные изменения смачивающей способности происходит при использовании УЗК с термостатированием.

Таким образом, сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует, что более интенсивно защитные свойства ОК изменяются при ультразвуковой обработке в кавитационном режиме воздействия, чем при воздействии высокочастотного магнитного поля.



В работе [10] также отмечается, что в результате исследований влияния концентрации водных растворов поликарбоксилатных суперпластификаторов и продолжительности их высокочастотной магнитно-импульсной и акустической активации на реологические свойства

цементно-песчаных смесей и физико-механические свойства бетонов установлено, что наиболее эффективной является акустическая обработка растворов суперпластификаторов в кавитационном режиме воздействия.

Применение ультразвука [11] приводит к разрушению исходной коагуляционной структуры, а также позволяет воздействовать на дисперсную систему как в макрообъеме, так и на микроуровне, что дает возможность рассматривать кавитацию в качестве эффективного инструмента управления процессами, протекающими на границе раздела фаз.

Следует отметить, что отсутствие ясного физического понимания механизмов воздействия на свойства различных композиций как высокочастотного магнитного поля, так и кавитации не позволяет сделать однозначных выводов об эффективности того или иного воздействия и требует дальнейших систематических экспериментальных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шехтер, Ю.Н., Крейн, С.Э., Тетерина, Л.Н. (1978), *Маслорастворимые поверхностно-активные вещества*, Москва, Химия, 1978, 304 с.
2. Шехтер, Ю.Н. (1979), *Рабоче-консервационные смазочные материалы*, Москва, Химия, 1979, 256 с.
3. Лиштван, И.И. (2002), Влияние физико-химических параметров на эффективность маслорастворимых ингибиторов коррозии, *Весті НАН Беларусі. Сер. хім. навук*, 2002, № 1, С. 30–37.
4. Теляшев, И.Р. (2001), Влияние механоактивационной обработки на полидисперсное строение нефтяных остатков, *Нефтехимия и нефтепереработка*, 2001, вып. XXXIII, С. 122–123.

## REFERENCES

1. Shehter, Ju.N., Krejn, S.Je., Teterina, L.N. (1978), *Maslorastvorimye poverhnostno-aktivnye veshhestva* [Oil-soluble synthetic surface active substances], Moscow, Himija, 1978, 304 pages.
2. Shehter, Ju.N. (1979), *Rabochе-konservacionnye smazochnye materialy* [Work-conserving lubricants], Moscow, Himija, 1979, 256 pages.
3. Lishtvan, I.I. (2002), The influence of physical and chemical parameters on the efficiency of oil-soluble inhibitors of corrosion [Vlijanie fiziko-himicheskikh parametrov na jeffektivnost' maslorastvorimyh ingibitorov korrozii], *News NAS of Belarus. Section chem. of sciences*, 2002, № 1, P. 30–37.

5. Нестеренко, А.И., Бердизов, Ю.С. (2008), Об использовании явления кавитации для крекинга углеводородов, *Химия и технология топлив и масел*, 2008, № 4, С. 41–43.
6. Пивоварова, Н.А., Унгер, Ф.Г., Туманян, Б.П. (2002), Влияние магнитного поля на парамагнитную активность нефтяных систем, *Химия и технология топлив и масел*, 2002, № 6, С. 30–32.
7. Ширяева, Р.Н., Кудашева, Ф.Х., Гимаев, Р.Н. (2008), Влияние на реологические свойства высоковязких нефтей неионогенных поверхностно-активных веществ и магнитного поля, *Химия и технология топлив и масел*, 2008, № 3, С. 31–33.
8. Дребенкова, И.В. (2010), Некоторые особенности изменения свойств олеиновой кислоты после ультразвуковой обработки, *Вестник Витебского государственного технологического университета*. Вып. 19, Витебск, 2010, С. 111–117.
9. Иоффе, Б.В. (1983), *Рефрактометрические методы химии*, Ленинград, Химия, 1983, 352 с.
10. Белоус, Н.Х. (2012), Влияние магнитной и акустической обработки растворов суперпластификаторов на свойства портландцементных бетонов, *Инженерно-физический журнал*, 2012, Т. 85, N 3, С. 460–467.
11. Круглицкий, Н.Н., Горovenko, Г.Г., Малюшевский, П.П. (1983), *Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях*, Киев, Наук. думка, 1983, 192 с.
4. Teljashev, I.R. (2001), Influence of mechanical activation treatment on polydisperse structure of oil residues [Vlijanie mehanoaktivacionnoj obrabotki na polidispersnoe stroenie neftjanyh ostatkov], *Petrochemistry and refining*, 2001, ed. XXXIII, pp. 122–123.
5. Nesterenko, A.I., Berdizov, Ju.S. (2008), About the use of cavitation for cracking hydrocarbons [Ob ispol'zovanii javlenija kavitacii dlja krekinga uglevodorodov], *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2008, № 4, pp. 41–43.
6. Pivovarova, N.A., Unger, F.G., Tumanjan, B.P. (2002), The influence of a H-field on paramagnetic activity of petroleum systems [Vlijanie magnitnogo polja na paramagnitnuju aktivnost' neftjanyh system], *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2002, № 6, pp. 30–32.
7. Shirjaeva, R.N., Kudasheva, F.H., Gimaev, R.N. (2008), Influence on the rheological properties of high-viscosity oils, nonionic surfactants and H-fields [Vlijanie na reologicheskie svojstva vysokovjazkih neftej neionogennyh poverhnostno-aktivnyh veshhestv i magnitnogo polja] Ширяева, Р.Н., *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2008, № 3, pp. 31–33.
8. Drebenkova, I.V. [and others]. (2010), Some features of change of the properties of oleinic acid after ultrasonic processing [Nekotorye osobennosti izmenenija svojstv oleinovej kisloty posle ul'trazvukovoj obrabotki], *Bulletin of the Vitebsk state technological University*. Ed. 19, Vitebsk, 2010, pp. 111–117.
9. Ioffe, B.V. (1983), *Refraktometricheskie metody himii*, [Refractometric methods of chemistry], Leningrad, Himija, 1983, 352 pages.
10. Belous, N.H. (2012), The influence of magnetic and acoustic processing of solutions of supersofteners on properties of Portland cement concrete [Vlijanie magnitnoj i akusticheskoj obrabotki rastvorov superplastifikatorov na svojstva portlandcementnyh betonov],

*Engineering-physical journal*, 2012, Т. 85, N 3,  
pp. 460– 467.

11. Kruglickij, N.N., Gorovenko, G.G.,  
Maljushevskij, P.P. (1983), *Fiziko-himicheskaja  
mehanika dispersnyh sistem v sil'nyh impul'snyh  
poljah* [Physical and chemical mechanics of  
disperse systems in high pulsed field], Kiev:  
Nauk. dumka, 1983, 192 pages. ill.

*Статья поступила в редакцию 13. 11. 2014 г.*

## СБАЛАНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЕЁ ИННОВАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

Т.В. Касаева, О. М. Андриянова

УДК 658.152

### РЕФЕРАТ

*СБАЛАНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ИННОВАЦИИ, ФИНАНСЫ, МАРКЕТИНГ*

*В статье ставится задача модификации сбалансированной системы показателей с целью выделения в ней инновационной составляющей как самостоятельного аспекта. В результате исследования определено место инновационного аспекта в ССП, которое, на взгляд автора, зависит от типа стратегии развития, реализуемой организацией. Также в статье представлен перечень показателей, характеризующий инновационный аспект ССП, который также дифференцирован в зависимости от типа реализуемой стратегии*

### ABSTRACT

*THE BALANCED SCORECARD, INNOVATION, FINANCE, MARKETING*

*This article is about modification of the Balanced Scorecard, which involves the allocation of innovation aspects as an independent aspect of the system. The place of the innovative aspects of the Balanced Scorecard was defined. This place, in the author's view, depends on the type of development strategy implemented by the organization. The article also presents indicators characterizing the innovative aspect of the Balanced Scorecard, which is also differentiated according to the type of the development strategy.*

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Активизация экономических процессов, ограниченность ресурсов экстенсивного роста определяют переход организаций на инновационный тип развития, позволяющий обеспечить устойчивое функционирование компании за счет эффективного использования собственных потенциальных возможностей, повышения роста продуктивности производственных ресурсов, сосредоточения усилий по развитию сферы науки и техники и др. Главной причиной, заставляющей организации переходить на инновационный путь развития, даже если шансы занять монопольное положение на рынке практически отсутствуют, является острая конкуренция, с которой приходится сталкиваться практически любой организации, поставляющей технологию, выпускающей продукцию или оказывающей какие-либо услуги. Организация обязана сама заботиться о сохранении конкурентоспособности и получении прибыли. Тема является актуальной, приобретая в современных условиях особую значимость в связи с реализацией государствен-

ной политики в области инновационного развития экономики страны.

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Современное развитие экономики характеризуется непрерывным увеличением роли инноваций как ключевого фактора успеха в конкурентной борьбе. В условиях острой конкурентной борьбы на рынке выигрывают только те организации, которые обеспечивают благоприятные условия для коммерциализации научных исследований. Добиться и удержать конкурентные преимущества возможно лишь посредством инноваций – это утверждение стало аксиомой для сегодняшнего бизнеса.

Значение нововведений для успешной деятельности организации чрезвычайно велико, хотя часто каждое из них само по себе дает относительно небольшой полезный эффект. Они служат источником роста дохода организации за счет повышения производительности труда, качества продукции, экономии ресурсов. Так, по данным PriceWaterhouseCoopers, компании,

обеспечившие себе 80 % дохода за счет новых продуктов, как правило, в течение пятилетнего периода удваивают общую стоимость всех выпущенных ими в обращение акций [6].

В настоящее время механизм управления инновациями является слабым звеном организационно-экономической структуры управления в отечественных организациях. Это объясняется не только высокой степенью изменчивости внешней среды, несистематизированной работой всех служб организации, но и отсутствием системного подхода к оценке инновационной деятельности, а также значительным несоответствием текущих целей компании с заявленной стратегией по причине непонимания стратегической цели и задач, стоящих перед компанией, работниками организации. В этой ситуации менеджерам важно сосредоточиться на ограниченном числе важных для бизнеса вопросов. Это практически невозможно сделать при отсутствии в организации формализованной системы, отслеживающей основные показатели и позволяющей на базе этой информации влиять на реализацию стратегии бизнеса. Мировой опыт показывает, что большинство компаний решают данную проблему путем внедрения сбалансированной системы показателей (ССП) [5].

Современные исследователи дополняют данную систему различными группами показателей, а некоторые даже перерабатывают ее, в результате получая отличную от предложенной Капланом и Нортонем сбалансированную систему показателей. Так, например, в своем исследовании Будаева М.С. предложила выделить следующие составляющие сбалансированной системы показателей: финансовую, операционную, инновационную деятельность, характеристики персонала, социальные и экологические обязательства организации [1]. Анализ работ исследователей в данной области позволяет сделать вывод, что в сбалансированной системе показателей все чаще в качестве отдельного аспекта выделяется инновационная составляющая. Это обусловлено необходимостью активной инновационной деятельности, так как инновации предоставляют организациям возможности добиться технологического доминирования на рынке и обеспечить победу в конкурентной борьбе.

## ВЫДЕЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОТДЕЛЬНЫЙ АСПЕКТ ССП

Для многих компаний в настоящее время способность изменяться, а также изменять свои продукты и поведение на рынке становится ключевым фактором успеха. Поэтому значение инновационной составляющей в деятельности компаний растет, и неизбежно будет расти. Осознав этот факт, руководителю компании нужно, прежде всего, определить ключевые принципы управления инновационными процессами. После этого необходимо создать и внедрить инновационные процессы, по крайней мере, на начальном уровне зрелости. Для управления этими процессами потребуется система показателей, позволяющая оценить эффективность инновационной деятельности.

Несмотря на то, что каждая успешная организация реализует собственную стратегию роста, в основе своей стратегии они используют один принцип: только постоянные улучшения и нововведения позволят добиться высокого уровня эффективности производства. Рисунок 1 подтверждает, что инновационная составляющая имеется в каждом аспекте классической версии сбалансированной системы показателей, разница лишь в том, какое место инновационная составляющая будет в ней занимать.

Цель работы заключалась в модификации сбалансированной системы показателей с целью выделения в ней инновационной составляющей как самостоятельного аспекта. Исходя из цели работы были решены следующие задачи: инновационная составляющая выделена в отдельный самостоятельный аспект, определено место инновационного аспекта в ССП в зависимости от вида стратегии, определен перечень показателей, характеризующих инновационный аспект ССП, также учитывающий тип реализуемой организацией стратегии, предпринята попытка выделения инновационной составляющей в ССП в ряде организаций г. Витебска.

Так, в случае, если организация выбрала инновационную стратегию как ключевую из деловых стратегий, то инновационная составляющая в сбалансированной системе показателей будет выдвинута на первый план и будет обеспечивать реализацию целей других блоков. Тогда схематично сбалансированная система будет выгля-



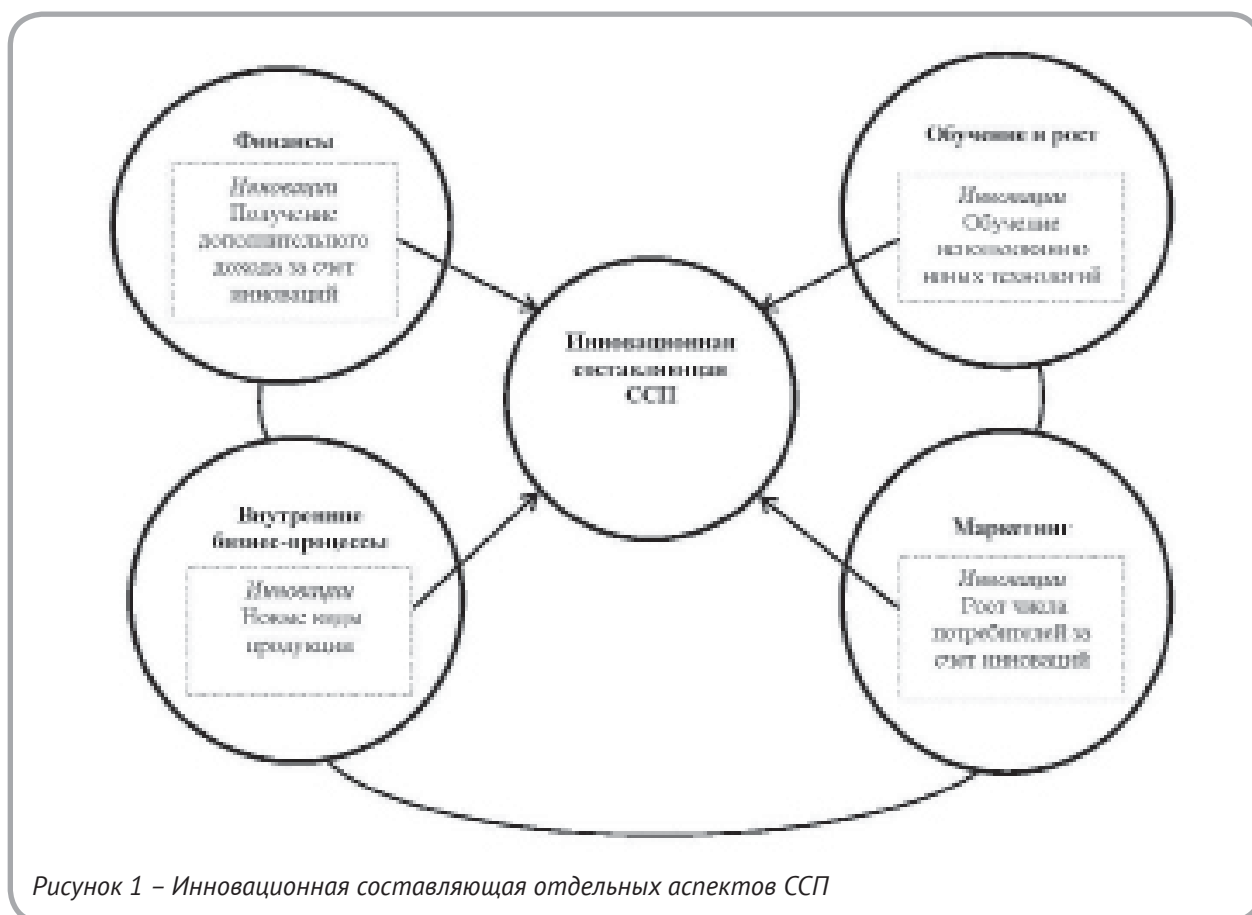


Рисунок 1 – Иновационная составляющая отдельных аспектов ССП

Источник: [2].

деть так, как это представлено на рисунке 2.

Таким образом, реализация целей во всех аспектах сбалансированной системы показателей будет осуществляться за счет инновационных процессов.

С другой стороны, даже в том случае, если организация не выделяет инновационную стратегию, в качестве ключевой, инновационная составляющая сбалансированной системы показателей, на наш взгляд, должна быть выделена в обособленный аспект, то есть данная система должна иметь следующие элементы, представленные на рисунке 3. В этом случае инновационный аспект ССП будет равнозначен остальным аспектам деятельности организации.

Внедрение инновационного аспекта в сбалансированную систему показателей предполагает ее дополнение показателями, характеризующими инновационную деятельность и инновационные процессы, протекающие в организации. В существующей корпоративной практике ограничиваются в основном следующими

показателями:

- затраты на НИОКР;
- доля затрат на НИОКР в выручке;
- количество патентов, полученных компанией за отчетный период;
- показатель эффективности инновационной деятельности.

Показатели, характеризующие долю затрат на НИОКР в выручке организации безусловно, могут оказаться полезными, но они не измеряют потенциальные инновационные возможности компании и не будут иметь существенного значения при выработке стратегических решений. Так, например, ежегодное освоение большого бюджета на исследовательские и опытно-конструкторские работы вовсе не гарантирует появление бесчисленного количества новых продуктов, которые потрясут рынок и станут источником дополнительных доходов компании. Также следует добавить, что такой показатель, как доля затрат на НИОКР в выручке, чаще применяется за рубежом, чем в условиях Республики Беларусь. Од-



Рисунок 2 – Модифицированная сбалансированная система показателей для организаций, реализующих инновационную стратегию развития

Источник: [2].

нако он может быть рассчитан и для отечественных организаций. Так, например ОАО «Газпром» в рамках программы инновационного развития, в качестве основного показателя эффективности, имеющего отношение непосредственно к инновациям, выделяет долю затрат на НИОКР в выручке. Показатель эффективности инновационной деятельности отечественные экономисты предпочитают заменять коэффициентом рентабельности инноваций, который характеризует уже конечный результат, полученный организацией в результате инновационной деятельности.

Рассмотрим систему показателей, которые могут применяться как индикаторы для оценки инновационных процессов, протекающих в организации. Надо отметить, что в практике разработки сбалансированной системы показателей для организаций, реализующих различные стратегии, набор показателей, характеризующих инновационную составляющую, как правило, различен. Так, у организаций, реализующих инновационную стратегию развития, большинство

показателей, включаемых в инновационный аспект сбалансированной системы показателей, будут характеризовать внутренние бизнес-процессы организации, так как непосредственно от их состояния будет зависеть эффективность протекания инновационных процессов в организации. Организации, реализующие отличные от инновационной стратегии развития, обычно, выбирают показатели инновационной деятельности в каждом аспекте сбалансированной системы показателей в равных пропорциях. Соответственно, учитывая этот факт, набор показателей, характеризующих инновационную деятельность организаций с различными типами реализуемых стратегий, будет дифференцирован (таблица 1).

Оптимальные наборы показателей и значения для каждого из них могут различаться в зависимости от профильной деятельности организации, а также от принятой ею стратегии развития. Набор показателей, характеризующий инновационную деятельность, определяется уже



Рисунок 3 – Модифицированная сбалансированная система показателей для организаций, реализующих отличные от инновационной стратегии развития

Источник: [2].

непосредственно при детальном исследовании организации и ее стратегических целей. Значения ключевых показателей устанавливаются непосредственно высшим руководством организации с учетом их видения деятельности компании через определенный промежуток времени.

#### АПРОБАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках работы было проведено исследование в двух организациях г. Витебска, реализующих на современном этапе различные стратегии развития: УП «Полимерконструкция» и КУП «Витебский кондитерский комбинат Витьба».

В рамках исследования, проведенного на УП «Полимерконструкция», была выделена группа показателей, характеризующих инновационные процессы в организации. Согласно мнению работников УП «Полимерконструкция», при помощи данных показателей можно оценить достижение организацией целей, заданных стра-

тегией ее развития, и, соответственно, данные показатели могут быть включены в сбалансированную систему показателей при ее разработке. В результате была получена особая модель сбалансированной системы показателей, в которой на первый план выдвигается блок инновационных показателей с учетом аспектов, которые на настоящем этапе развития представляют наибольший интерес для предприятия (рисунок 4).

Выделение инновационной составляющей в сбалансированной системе показателей УП «Полимерконструкция» позволяет продемонстрировать ту основу, на которой строится инновационная стратегия предприятия. В настоящее время инновационная стратегия развития УП «Полимерконструкция» направлена на наращивание инновационного потенциала, о чем свидетельствуют такие показатели сбалансированной системы, как доля средств от оборота, направляемых на приобретение технологически новых

Таблица 1 – Показатели, характеризующие инновационную деятельность, включаемые в сбалансированную систему показателей в зависимости от типа реализуемой стратегии

Для компаний, реализующих инновационные стратегии	Для компаний, реализующих отличные от инновационной стратегии
Финансовые показатели:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- коэффициент рентабельности инноваций;</li> <li>- затраты на НИОКР;</li> <li>- доля затрат на НИОКР в выручке;</li> <li>- доля прибыли от реализации инновационной продукции в общем объеме прибыли от реализации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- затраты на НИОКР;</li> <li>- доля затрат на НИОКР в выручке</li> </ul>
Показатели внешнего окружения (клиентский аспект)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- доля выручки от реализации новых продуктов в общем объеме выручки за последний год;</li> <li>- количество новых рынков сбыта, освоенных за период;</li> <li>- количество новых продуктов, сервисов и бизнесов, которые компания вывела на рынок за последний год;</li> <li>- количество разработанных новых продуктов, экспортируемых на зарубежный рынок, за последний год;</li> <li>- отношение числа клиентов, считающих компанию инновационной, к их общему количеству</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- доля выручки от реализации новых продуктов в общем объеме выручки за последний год;</li> <li>- количество новых продуктов, сервисов и бизнесов, которые компания вывела на рынок за последний год;</li> <li>- количество новых рынков сбыта, освоенных за период</li> </ul>
Показатели внутренних процессов	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- длительность инновационного цикла;</li> <li>- количество разработанных и внедренных технологий в виде результатов НИОКР за год;</li> <li>- количество объектов, поставленных на бухгалтерский баланс в расчетном году по результатам проведения НИОКР;</li> <li>- количество технологий, разработанных за отчетный год, защищенных патентами;</li> <li>- количество действующих договоров по созданию технологий со сторонними организациями;</li> <li>- доля технологически новых основных средств в общем объеме поступивших основных средств за период;</li> <li>- доля средств от оборота, направленных на приобретение технологически новых основных средств;</li> <li>- отношение количества технологий, разрабатываемых сторонними организациями, к общему количеству разрабатываемых технологий;</li> <li>- количество технических диалогов и проектов, осуществляемых в рамках программ научно-технического сотрудничества с зарубежными компаниями;</li> <li>- количество разработок, выполняемых в рамках программ научно-технического сотрудничества с отечественными компаниями;</li> <li>- показатель эффективности инновационной деятельности (отношение объема производства инновационной продукции к затратам на инновационную деятельность)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- удельный вес инновационной продукции в общем объеме произведенной либо отгруженной продукции;</li> <li>- затраты на инновационную деятельность и др.;</li> <li>- количество технологий, разработанных на предприятии за год по результатам НИОКР;</li> <li>- доля технологически новых основных средств в общем объеме поступивших основных средств за период;</li> <li>- отношение реализованных инновационных идей к общему числу выдвинутых предложений</li> </ul>
Показатели обновления и развития	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- количество зарегистрированных патентов;</li> <li>- продолжительность проектов по исследованиям и разработкам;</li> <li>- количество опорных вузов,</li> <li>- количество базовых кафедр,</li> <li>- количество работников высшей квалификации (кандидатов и докторов наук);</li> <li>- количество публикаций научных сотрудников</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- количество инновационных идей, выдвинутых сотрудниками компании в течение последнего года;</li> <li>- коэффициент приема молодых специалистов, задействованных в инновационных проектах;</li> <li>- количество работников высшей квалификации (кандидатов и докторов наук)</li> </ul>

Составлено автором

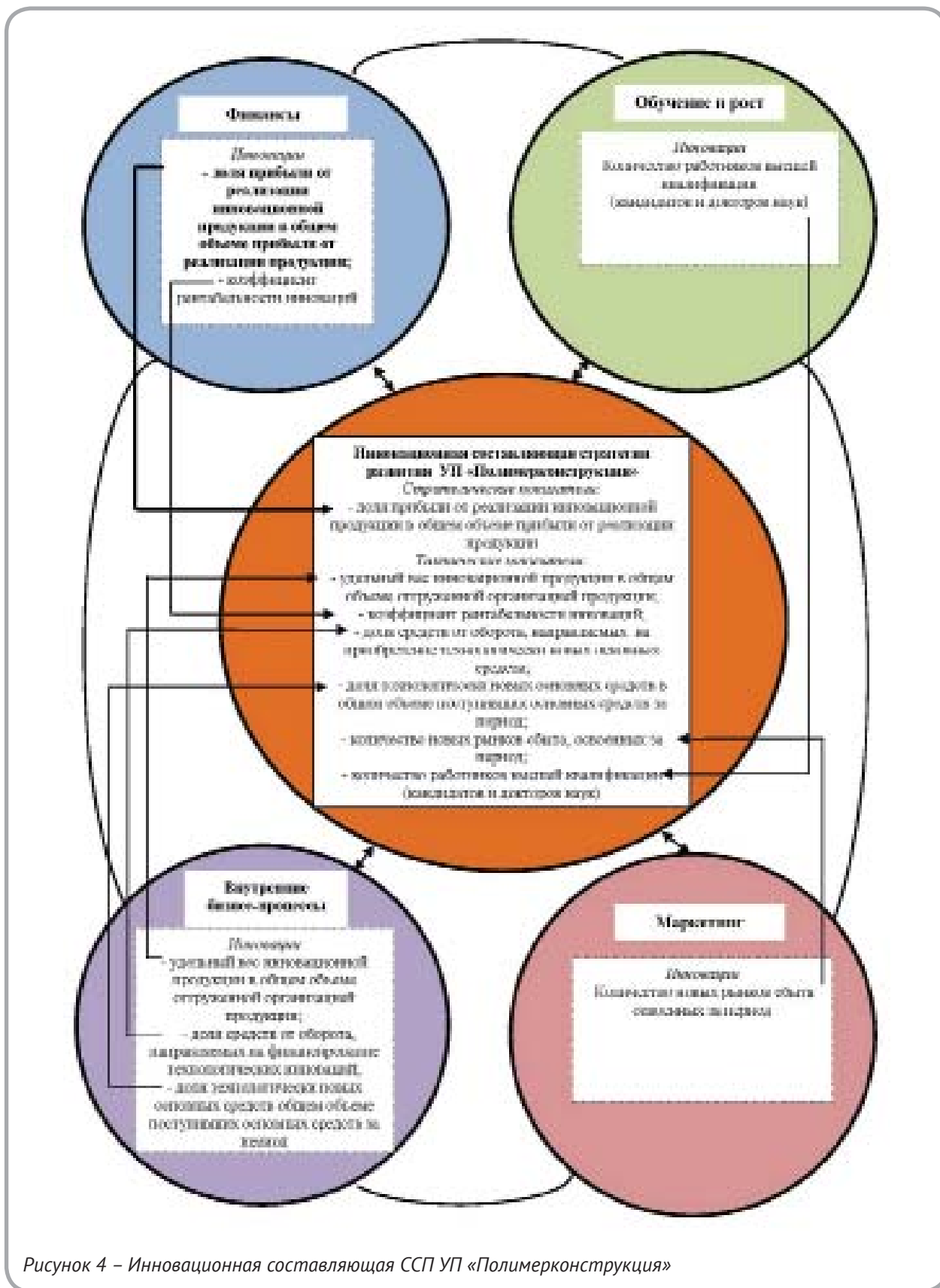


Рисунок 4 – Инновационная составляющая ССП УП «Полимерконструкция»

Составлено автором.

основных средств; доля технологически новых основных средств в общем объеме поступивших основных средств за период; количество работников высшей квалификации (кандидатов и докторов наук). Это связано с тем, что руководство УП «Полимерконструкция» считает, что наращивание инновационного потенциала выступает одним из важных факторов повышения инновационной активности предприятия, что, соответственно, ведет к росту эффективности деятельности. Так, за счет внедрения технически новых основных средств, а также привлечения работников, имеющих кандидатскую и докторскую степень, в штат сотрудников организации, предприятие сможет производить высокотехнологичную продукцию, которая будет конкурентоспособна на существующих внутреннем и внешнем рынках и позволит в дальнейшем выйти на новые перспективные рынки.

В рамках исследования, проведенного на КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба», были выделены также показатели, отражающие стратегию предприятия, в каждом аспекте сбалансированной системы показателей (рисунок 5). Выбор данных показателей определялся совместно с руководящим составом предприятия с учетом целей развития КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба» на ближайший период. Как мы видим из рисунка 5, несмотря на то, что предприятие не реализует инновационную стратегию развития, вместе с тем показатели, характеризующие инновационные процессы, в сбалансированной системе показателей все же присутствуют. Чтобы акцентировать внимание руководства организации на выполнение целей по данным показателям, имеет смысл выделить инновационную составляющую в качестве самостоятельного аспекта. Все показатели, включенные в инновационный аспект, являются тактическими и характеризуют текущее состояние бизнес-процессов. Топ-менеджеры предприятия не выделили ни одного инновационного показателя в аспекте финансов. Данная ситуация вызвана тем, что финансовые показатели, которые обычно подлежат включению в инновационную составляющую, присущи в большей мере организациям, реализующим инновационную стратегию развития и применяются для оценки эффекта, полученного в результате реализации

инноваций.

Так как основной целью деятельности КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба» является расширение ассортимента продукции за счёт организации производства ее новых видов и увеличения объема продаж, за счет укрепления своих позиций на существующих рынках и проникновения на новые, то показатели, включаемые в инновационную составляющую, коснулись только внутренних бизнес-процессов и маркетингового аспекта. Так, выпуская новые инновационные продукты на рынок, предприятие увеличивает удельный вес инновационной продукции в общем объеме отгруженной, тем самым повышая свою конкурентоспособность. Новые инновационные продукты увеличивают объем производства продукции предприятия, поэтому сотрудникам КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба» необходимо искать новые и перспективные рынки сбыта, которые можно завоевать только, производя конкурентоспособную продукцию. Тут и потребуются инновационные идеи, выдвигаемые сотрудниками предприятия. Как мы видим, в выбранной системе показателей поддерживается принцип единства и взаимосвязи с показателями других аспектов.

Таким образом, проведенное исследование показало, что выделение инновационной составляющей в сбалансированной системе показателей в настоящий момент деятельности является актуальным. В современной экономике инновационные процессы присутствуют в деятельности практически любой организации, разница лишь в том, какое место они в ней занимают. Если организация реализует инновационную стратегию развития, то инновации пронизывают все аспекты деятельности организации (УП «Полимерконструкция»), если реализует иные стратегии развития инновации, описывают отдельные аспекты стратегии развития (КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба»).

В ходе проведенного исследования также были определены значения ключевых показателей инновационного аспекта, которые позволят в дальнейшем оценить степень реализации стратегии организации в области инноваций.

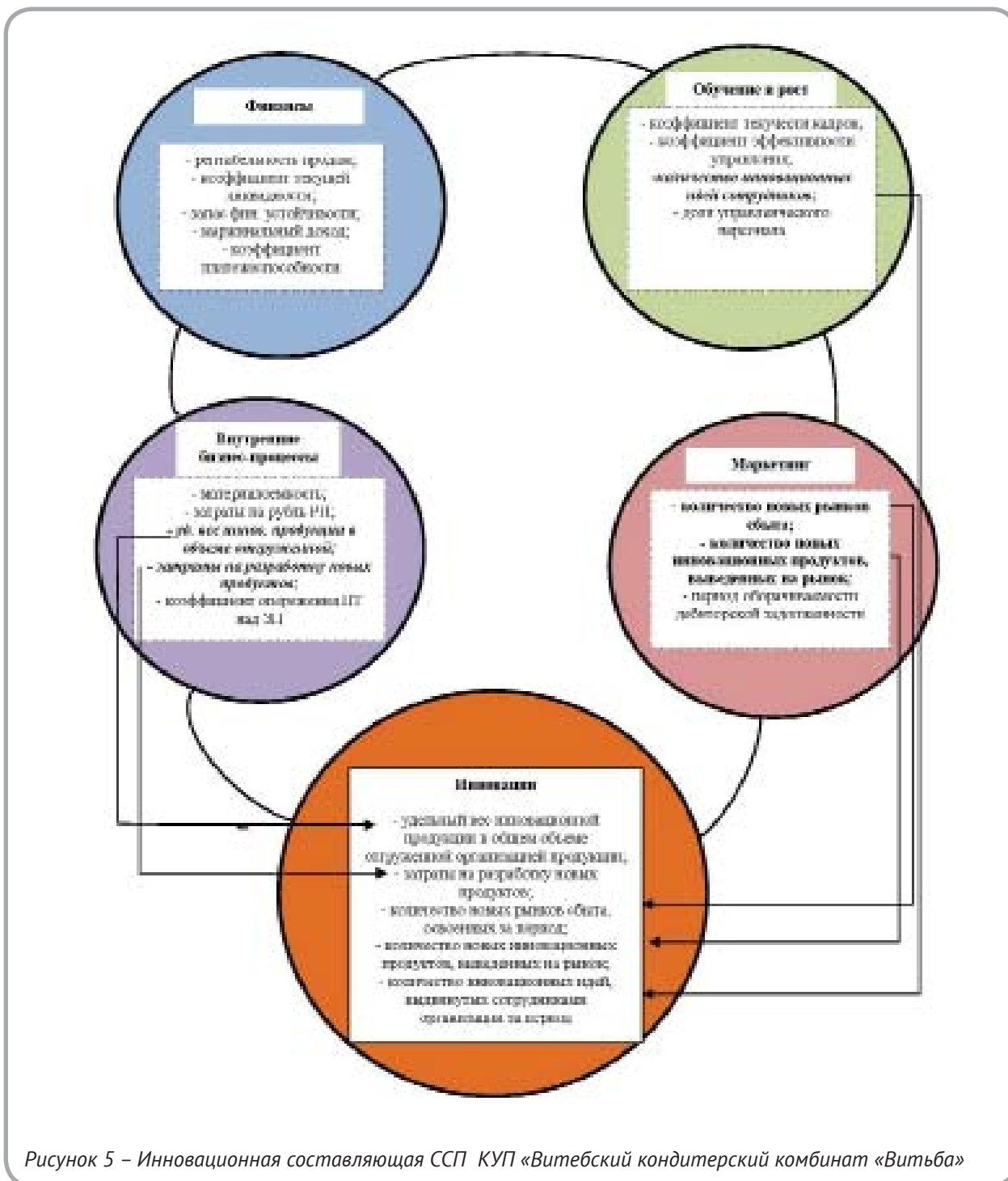


Рисунок 5 – Инновационная составляющая ССП КУП «Витебский кондитерский комбинат «Витьба»

Составлено автором.

**ВЫВОДЫ**

Практическая значимость исследования состоит в том, что разработанные положения создают основу для оценки инновационной составляющей стратегии развития коммерческой организации. Применение сбалансированной

системы показателей позволит повысить эффективность деятельности организации за счет превентивного управления в инновационной сфере.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будаева, М.С. (2008), Инновационная составляющая сбалансированной системы показателей. *Известия ИГЭА* (2), С. 81-84.
2. Касаева, Т.В., Андриянова, О.М. (2013), *Инновационная составляющая сбалансированной системы показателей*. Витебск: УО «ВГТУ», С. 209-213.
3. Каплан, Р.С., Нортон, Д.П. (2006), *Использование сбалансированной системы показателей как системы стратегического менеджмента*. Москва: Альпина Бизнес Бук, 356 с.
4. Крылов, С.И. (2007), Сбалансированная система показателей как аналитический инструмент стратегического управления в условиях современной рыночной экономики. *Экономический анализ: теория и практика* (24), С. 67-71.
5. Рябиков, В.С., Касаева, Т.В. (2013), Сбалансированная система показателей: особенности применения в условиях национальной экономики. *Вестник Витебского государственного технологического университета* (24), С. 157-166.
6. Шувалов, В.Н. (2007), *Интеллектуально-креативные ресурсы конкурентоспособности предпринимательской структуры*. Санкт-Петербургский государственный экономический университет, С. 20.

## REFERENCES

1. Budaeva, M.C. (2008), Innovation aspect of The Balanced Scorecard [Innovationnayasostavlyaiyushchyasbalansirovannoysistemipokazateley]. *News ISEA* (2), pp. 81-84.
2. Kacaeva, T.V., Anryinava, O.M. *Innovationnaya sostavlyaiyushchya sbalansirovannoy sistemi pokazateley* [Innovation aspect of The Balanced Scorecard]. Vitebsk: VGTU – Vitebsk: VSTU, pp. 209-213.
3. Kaplan, T.V., Norton, D.P. (2006), *Ispolzovaniye sbalansirovannoy sistemi pokazateley kak sistemi strategicheskogo menedgmenta*. [Using The Balanced Scorecard as a strategic management system], Moskva: Alpina Bisness Grup, 356 p.
4. Krilov, S.I. (2007), The Balanced Scorecard as an analytical tool for strategic management in a modern market economy [Sbalansirovannaya systema pokazateley kak analiticheskyy instrument strategicheskogo upravleniya v usloviyah sovremennoy rinochnoy ecomomiki]. *Economicheskyy analis: teoria i praktika upravleniya – Economic analysis: The theory and practice of management*, pp. 67-71.
5. Ryabikov, V.S. Kasaeva, T.V. (2013), The balanced scorecard – application features in the conditions of national economy [Sbalansirovannaya systema pokazateley: osobennosty primeneniya v usloviyah nazionalnoy ekonomiki]. *Vestnik vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Herald Vitebsk State Technological University*, pp. 157-166.
6. Shuvalov, V.N. (2007), *Intellectualno-kreativnye resursy konkurentosposobnosty predprinimatelskoy sructury* [Intellectual and creative resources competitiveness of business structure]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyi universitet – St-Peterburg State Economic University, pp. 20.

Статья поступила в редакцию 07.04.2014 г.



## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ОБУВИ: МЕТОДИКА И АПРОБАЦИЯ

В.В. Квасникова, О.Р. Левшицкая

УДК 339.564:67/68

### РЕФЕРАТ

*ЭКСПОРТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, ВНЕШНЯЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ВНУТРЕННЯЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, РЫНОЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, ФИНАНСОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ*

*На основе комплексного подхода разработана методика оценки эффективности использования экспортного потенциала организации. Система показателей, включающая частные, обобщающие и интегральный показатель, позволяет оценить эффективность использования экспортного потенциала с позиций самой организации, региона и страны. По предложенной авторами методике дана оценка эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви концерна «Беллепром» за 2010 – 2012 годы.*

### ABSTRACT

*EXPORT POTENTIAL, EXTERNAL EFFECTIVENESS, INTERNAL EFFECTIVENESS, RESOURCE POTENTIAL, MARKET POTENTIAL, FINANCIAL POTENTIAL*

*The method for the evaluation of the export potential effectiveness of the organization was worked out in virtue of an integrated approach. The system of indicators, including private, general and integral indicators permits to evaluate the export potential effectiveness from the standpoint of the organization, region and country. The export potential effectiveness of the shoes producing organizations of «Bellegprom» concern for the 2010 – 2012 years was evaluated applying this method.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Стратегическая роль наращивания экспортного потенциала отдельных отечественных организаций и целых отраслей экономики состоит в решении проблем пополнения золотовалютных резервов страны, способствует формированию положительного внешнеторгового сальдо, создает предпосылки для активизации и создания конкурентных преимуществ белорусской экономики, ее устойчивого экономического роста. В этой связи одной из важнейших является проблема оценки и развития экспортных потенциалов как отдельных организаций, так и отраслей.

Теоретические и методические основы исследования экспортного потенциала организации изложены в работах таких зарубежных и отечественных ученых-экономистов, как Азмина Ю.М., Александровича Я.М., Андриановой В.Д., Бондаренко В., Воробьевой Л.В., Грачева Ю.Н., Дадалко С., Дубко С., Дружининой М.А., Друцкой Е.О., Ивашиненко Е.О., Котлера Ф., Лебедевой М.В., Лифица И.М., Медведева П.М., Михайловско-

го В.П., Михайлиной А.Н., Мосейко В.О., Окрепилова В.В., Попова Е.В., Попова С.Г., Портера М., Сейфуллаевой М.Э., Сидоренко А.В., Сычева С., Чирановой Р.А., Фатхутдинова Т.И., Фоменка Д., Шимова В.Н., Юданова А.Ю. и других.

Между тем, опыт функционирования отечественных организаций по производству обуви показывает, что оценка использования их экспортных потенциалов носит фрагментарный характер. Такое положение дел обусловлено тем, что существующие на сегодняшний день научные разработки по оценке эффективности использования экспортного потенциала ориентированы, прежде всего, на определение внутренних показателей организации и не учитывают специфику различных видов деятельности.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из этого цель статьи состоит в разработке методики оценки эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви.

Задачами исследования являются:

- сформулировать теоретические основы экспортного потенциала организации;
- изучить и систематизировать существующие подходы к оценке эффективности использования экспортного потенциала организаций;
- обосновать систему показателей для оценки эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви;
- апробировать разработанную методику по данным организаций по производству обуви концерна «Беллепром».

Анализ научной литературы по проблеме [1, 2, 3, 4] позволил уточнить определение и структуру экспортного потенциала организации, а также выявить существующие подходы к оценке эффективности его использования. Под экспортным потенциалом организации понимаются совокупные ресурсы, которые могут быть мобилизованы для производства конкурентоспособной продукции и её эффективной реализации на внешних рынках, а также возможности организации по привлечению прямых иностранных инвестиций и участию в международном сотрудничестве.

Экспортный потенциал организации необходимо рассматривать как совокупность ресурсного, финансового и рыночного потенциалов. Ресурсный потенциал организации отражает эффективность использования ресурсов, необходимых для производства и реализации экспортной продукции. Финансовый потенциал организации, по сути, характеризует результаты, получаемые от осуществления экспортной деятельности, а рыночный потенциал отражает способность организации соответствовать требованиям рынка, а именно мировым системам управления качеством, национальным и международным стандартам качества продукции, уровню конкурентоспособности продукции, рыночной стратегии организации, эффективности маркетинга.

Теоретическое исследование позволило выявить три подхода к оценке эффективности использования экспортного потенциала организации. В соответствии с первым подходом, предложенным авторами С. Дубко, С. Дадалко и Д. Фоменок, оценка экспортного потенциала

организации производится на основе 8 показателей (таблица 1).

Представленная система показателей заслуживает внимания, так как позволяет оценить эффективность реализации продукции на внешнем рынке, результаты, полученные организацией от осуществления экспортной деятельности, соответствие продукции международным стандартам. Вместе с тем показатель «конкурентоспособность производителя», рассчитываемый как отношение выручки от экспортной деятельности на затраты по производству и реализации экспортной продукции, характеризует лишь эффективность производства и не учитывает такие важные составляющие конкурентоспособности производителя, как масштабы его деятельности, финансовое состояние и конкурентоспособность товара. Кроме того, методика оценки эффективности использования экспортного потенциала имеет общий характер и не принимает во внимание отраслевую принадлежность организаций, так показатель «доля инновационной продукции» можно применять только в случаях, когда производство продукции тесно связано с технологическими инновациями (новые методы производства, инновационные материалы и производственные процессы). В этом плане производство обуви является достаточно стабильным и статичным видом деятельности, а инновационной продукцией является, прежде всего, обувь, соответствующая последним тенденциям моды, изготовленная с применением оригинальных дизайнерских решений, а это не в полной мере соответствует определению инновационной продукции.

Система показателей оценки эффективности использования экспортного потенциала организации, предложенная учеными В.О. Мосейко и Ю.М. Азминой, в определенной степени дублирует первый подход, так как пять из восьми показателей совпадают (таблица 2).

Авторы второго подхода больше внимание уделяют финансовой составляющей экспортного потенциала, вводя такие показатели, как коэффициент автономии и коэффициент текущей ликвидности.

Предложенные в первом и втором подходе показатели характеризуют внутреннюю среду организации и оценивают эффективность ис-

Таблица 1 – Система показателей оценки эффективности использования экспортного потенциала промышленных организаций в соответствии с первым подходом

Показатели	Алгоритм расчета	Характеристика показателя
1. Эффективность производства экспортной продукции	$Эпрэ = Цэ/Сэ$ , где $Цэ$ – стоимость экспортной продукции во внутренних ценах, млн. руб.; $Сэ$ – себестоимость экспортной продукции, млн. руб.	Характеризует эффективность производства продукции для организации-экспортера; чем выше показатель, тем более целесообразно производство данного вида продукции
2. Удельный вес прибыли от экспорта продукции в общем объеме прибыли от реализации организации-экспортера	$Удвпэ = Пэ/По$ , где $Пэ$ – прибыль от реализации продукции на экспорт, млн. руб.; $По$ – общая величина прибыли организации-экспортера, млн. руб.	Показывает долю прибыли от экспорта продукции в общей сумме прибыли от реализации продукции организации-экспортера; чем больше Удвпэ, тем больше значимость экспорта данного вида продукции для организации
3. Рентабельность экспортных продаж	$Рэ = Пэ/Вэ$ , где $Вэ$ – выручка от реализации продукции на экспорт, млн. руб.	Показывает прибыльность экспорта продукции; чем выше показатель, тем выгоднее экспорт данного вида продукции для организации-экспортера
4. Удельный вес экспорта в общем объеме производства продукции организации-экспортера	$Удвэ = Оэ/Опр$ , где $Оэ$ – объем экспорта продукции, млн. руб., (нат.ед.); $Опр$ – общий объем производства продукции, млн. руб., (нат. ед.)	Характеризует экспортную ориентированность производства промышленной организации; чем выше данный показатель, тем более значимо экспортное направление для организации-экспортера
5. Конкурентоспособность производителя	$Кп = Вэ/(Зп + Зр)$ , где $Вэ$ – выручка от реализации продукции на экспорт, млн. руб.; $Зп$ – затраты внутри страны на производство экспортной продукции, млн. руб.; $Зр$ – затраты от реализации экспортной продукции на внешнем рынке, млн. руб.	Значение коэффициента выше единицы характеризует прибыльность экспорта для организации; чем выше значение показателя, тем более сильными конкурентными позициями обладает организация
6. Доля продукции, сертифицированной на соответствие международным стандартам	$ДП_{серт} = П_{серт}/По$ , где $П_{серт}$ – объем сертифицированной продукции, млн. руб., нат. ед.; $По$ – общий объем производства, млн. руб., нат. ед.	Определяет экспортные возможности организации, поскольку во многие страны поставки могут осуществляться только при наличии международных сертификатов
7. Доля инновационной продукции	$ДПи = Пи/По$ , где $Пи$ – объем инновационной продукции, млн. руб., нат.ед.;	Определяет отношение инновационной продукции к общему количеству выпускаемой продукции
8. Доля продукции, поставляемой в страны дальнего зарубежья	$ДПэж = Пдз/По$ , где $Пдз$ – объем продукции, поставляемой в страны дальнего зарубежья, млн. руб., нат. ед.	Показывает отношение продукции, идущей на экспорт к общему количеству продукции; чем выше данный показатель, тем более значимо экспортное направление реализации продукции для организации-экспортера

Источник: [5].

Таблица 2 – Система показателей оценки эффективности использования экспортного потенциала промышленных организаций в соответствии со вторым подходом

Показатели	Алгоритм расчета	Характеристика показателя
1. Эффективность производства продукции для реализации на экспорт	$Эпрэ = Цэ/Сэ$ , где <b>Цэ</b> – стоимость продукции, выпускаемой на экспорт во внутренних ценах, млн. руб.; <b>Сэ</b> – себестоимость экспортной продукции, млн. руб.	Показывает целесообразность производства продукции на экспорт. Чем выше данный показатель, тем эффективнее производство экспортной продукции
2. Доля прибыли от экспорта продукции в общей прибыли от реализации продукции	$Дпэ = Пэ/По$ , где <b>Пэ</b> – прибыль от реализации продукции на экспорт млн. руб.; <b>По</b> – общая величина прибыли от реализации, млн. руб.	Отражает влияние экспортной деятельности на финансовые результаты организации. Чем больше показатель, тем больше значимость экспорта продукции для организации
3. Рентабельность продаж на экспорт	$Рэ = Пэ/Вэ$ , где <b>Вэ</b> – выручка от реализации продукции на экспорт, млн. руб.	Характеризует прибыльность экспортной деятельности; чем выше показатель, тем выгоднее экспорт продукции для организации-экспортера
4. Удельный вес экспорта в общем объеме реализации продукции организации-экспортера	$Удвэ = Вэ/Вр$ , где <b>Вэ</b> – объем экспорта продукции, млн. руб., <b>Вр</b> – объем реализации продукции, млн. руб.	Характеризует экспортную ориентированность производства промышленности; чем выше данный показатель, тем более значимо экспортное направление реализации продукции для предприятия-экспортера
5. Коэффициент автономии	$Ка = Сс/Бо$ , где <b>Сс</b> – собственные средства организации, млн. руб.; <b>Бо</b> – валюта баланса, млн. руб.	Определяет долю собственных средств в валюте баланса
6. Коэффициент текущей ликвидности	$Ктл = ОбА/КДО$ , где <b>ОбА</b> – краткосрочные активы, млн. руб.; <b>КДО</b> – краткосрочные долговые обязательства, млн. руб.	Дает общую оценку ликвидности активов, показывая сколько рублей текущих активов организации приходится на один рубль текущих обязательств
7. Доля инновационной продукции	$ДПи = Ви/Во$ , где <b>Ви</b> – объем выпуска инновационной продукции, млн. руб.; <b>Во</b> – общий объем выпуска продукции, млн. руб.	Определяет отношение инновационной продукции к общему количеству выпускаемой продукции
8. Эффективность продаж экспортной продукции	$Эп = Пэ/Зпрэ$ , где <b>Зпрэ</b> – затраты на производство экспортной продукции, млн. руб.	Характеризует эффективность продаж экспортной продукции. Чем выше показатель, тем более выгодно производство данного вида продукции на экспорт

Источник: [6].

пользования экспортного потенциала только с позиции самой организации, при этом интересы региона и страны в целом не учитываются. Так, увеличение объема экспорта и прибыли от экспортной деятельности, повышение уровня рен-

табельности экспортной продукции свидетельствуют о повышении эффективности экспортной деятельности организации-производителя. Однако, только по этим показателям нельзя судить об эффективности экспортной деятельности

организации с позиции региона и государства. Если организация для производства продукции в основном использует отечественное сырье, материалы и комплектующие, то, безусловно, экспортная деятельность эффективна не только на микро-, но и на мезо- и макроуровнях. Напротив – в условиях дефицита золотовалютных резервов при большой доле в затратах на производство продукции импортных составляющих, с точки зрения общегосударственных интересов, такой экспорт будет неэффективен. Таким образом, очевидно, что оценку эффективности использования экспортного потенциала организации необходимо осуществлять не только с позиции самой организации (внутренняя эффективность), но и с позиции региона и страны (внешняя эффективность).

Общегосударственные интересы при оценке эффективности экспортного потенциала учитываются в третьем подходе, который предложен в работах М.С. Сычева, А.В. Сидоренко, Н.А. Чернавиной (таблица 3).

Изучение существующих подходов к оценке эффективности использования экспортного потенциала позволяет сделать вывод о том, что в основном показатели характеризуют внутреннюю эффективность и не учитывают внешнюю эффективность использования экспортного потенциала; представленные системы показателей включают только частные показатели, что делает невозможным дать однозначную оценку эффективности использования экспортного потенциала, так как в ряде случаев они имеют разнонаправленные значения; подходы носят общий характер и не учитывают отраслевые особенности организаций.

Исходя из вышеизложенного, предложена собственная методика оценки эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви, предусматривающая оценку внутренней и внешней эффективности на основе системы частных и обобщающих показателей, а также определение интегрального показателя эффективности использования экспортного потенциала организации.

Методика оценки эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви включает следующие этапы:

1. Определение частных показателей, ха-

рактеризующих внешнюю и внутреннюю эффективность использования экспортного потенциала организации по производству обуви (таблица 4).

2. Осуществляется перевод частных показателей в баллы на основе разработанной оценочной шкалы (таблица 5).

3. Определение обобщающих и интегральных показателей эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви (таблица 6).

Значения коэффициентов значимости обобщающих показателей эффективности использования экспортного потенциала установлены на основе коллективного опроса экспертов, которыми выступили работники организаций по производству обуви, концерна «Беллегпром», ученые-экономисты.

4. На основе значений обобщающих и интегральных показателей с использованием оценочной шкалы делается вывод об эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви (таблица 7).

Апробация разработанной методики была проведена по данным 10 организаций по производству обуви, концерна «Беллегпром» за 2010 – 2012 годы. Полученные значения обобщающих и интегральных показателей, характеризующих внутреннюю и внешнюю эффективность использования экспортного потенциала организаций по производству обуви представлены в таблице 8.

Данные таблицы свидетельствуют, что среди составляющих экспортного потенциала наиболее эффективно использовался финансовый потенциал, но с тенденцией снижения с 4 баллов в 2010 г. до 3,4 балла в 2011, в 2012 году показатель принимает значение 3,6 балла, но в разрезе исследуемых организаций ситуация неоднозначна.

Так, наиболее результативно с финансовой точки зрения функционируют: ООО «Марко», ЧП «СанМарко», ОАО «Красный Октябрь». Низкий уровень использования финансового потенциала имеет ООО «Луч». Это связано с тем, что масштабы деятельности организации за исследуемый период невелики.

Рыночный потенциал в целом по концерну используется достаточно эффективно. Лидерами

Таблица 3 – Система показателей оценки эффективности использования экспортного потенциала промышленных организаций в соответствии с третьим подходом

Показатели	Алгоритм расчета	Характеристика показателя
1	2	3
<b>Показатели эффективности экспорта на макроуровне</b>		
Показатели состояния и уровня доходности экспорта		
1. Показатель народнохозяйственной эффективности экспорта	$Энх = В/Зэ,$ где <b>В</b> – валютные поступления от экспорта продукции с учетом ценности валюты, млн. руб.; <b>Зэ</b> – затраты на выпуск экспортной продукции, млн. руб.; $Зэ = Сэ + Здр + Э.П.,$ где <b>Сэ</b> – себестоимость экспортной продукции, млн. руб.; <b>Здр</b> – другие затраты организации-экспортера на производство и реализацию экспортной продукции, млн. руб.; <b>Э.П.</b> – экспортные платежи, млн. руб.	Характеризует прибыльность экспорта определенным видом продукции для экономики страны
2. Показатель бюджетной эффективности экспорта	$Эб = (ТП + НП) / В,$ где <b>ТП</b> – таможенные платежи в стране импортера, млн. руб.; <b>НП</b> – налоговые платежи, млн. руб.	Выражает отношение суммы поступлений средств в государственный бюджет при экспорте продукции к инвалютной выручке. Чем больше показатель, тем выше бюджетная эффективность
Показатель значимости экспорта продукции для экономики страны		
3. Коэффициент экспортной квоты	$Кэ.к = Оэ / Опр,$ где <b>Оэ</b> – объем экспорта продукции в регионе (стране), млн. руб. (нат. ед.); <b>Опр</b> – общий объем производства продукции в регионе (стране), млн. руб., (нат. е д.)	Показывает долю экспорта в общем объеме производства определенной продукции в регионе или стране
Показатель экспортной специализации		
4. Коэффициент экспортной специализации	$Кэ.к = Оэ / Оэ.ст.,$ где <b>Оэ.ст.</b> – общий объем экспорта региона (страны), млн. руб., (нат. ед.)	Отражает долю экспорта определенной продукции в общем объеме экспорта региона или страны
<b>Показатели эффективности экспорта на микроуровне</b>		
Показатели доходности		
5. Показатель экономической эффективности	$Ээ = Вэ / Зэ,$ где <b>Вэ</b> – выручка от реализации продукции на экспорт, млн. руб.; <b>Зэ</b> – полные затраты организации на экспорт, млн. руб.	Если показатель больше 1, то экспорт данной продукции целесообразен и эффективен, в ином случае – нет.
6. Соотношение экспортной и внутренней цен	$Ээ.в.р. = Цэ / Цв,$ где <b>Цв</b> – стоимость экспортной продукции в случае ее реализации на внутреннем рынке страны, тыс.руб.; <b>Цэ</b> – стоимость экспортной продукции, тыс. руб.	Характеризует выгодность производства экспортной продукции в соотношении с ее реализацией на внутреннем рынке страны

Продолжение таблицы 3		
1	2	3
Показатели значимости экспорта продукции		
7. Удельный вес прибыли от реализации продукции на экспорт в общем объеме прибыли от реализации продукции	$Уд.в_{эп} = Пэ / По \times 100,$ где $Пэ$ - прибыль от реализации продукции на экспорт, млн.руб.; $По$ - общая величина прибыли организации от реализации продукции, млн. руб.	Характеризует значимость экспорта данного вида продукции для организации
Показатели рентабельности		
8. Рентабельность экспортных продаж	$Рэ.пр = Пэ / Вэ \times 100,$	Показывает долю прибыли, полученной организацией от экспорта в выручке от экспорта. Отражает эффективность экспортных операций
9. Рентабельность производства экспортной продукции	$Рэ = Пэ / Сэ \times 100,$ где $Сэ$ - себестоимость экспортируемой продукции, млн. руб.	Отражает эффективность производства продукции, реализуемой на экспорт
Показатель конкурентоспособности продукции на мировом рынке		
10. Конкурентоспособность продукции на мировом рынке	$К = P / C,$ где $P$ - суммарные потребительские свойства продукции; $C$ - полные затраты на приобретение и потребление продукции	Является обобщающим показателем конкурентоспособности продукции на внешнем рынке

Источник: [4, 7, 8].

по использованию рыночного потенциала являются: СООО «Марко» (4 балла из 5 возможных в 2011-2012 гг.), ЗАО СП «Отико» (3,9 баллов в 2012 г.), ОАО «Красный Октябрь» (3,7 баллов в 2012 г.). Отрицательная динамика в использовании рыночного потенциала наблюдается в организациях: ОАО «Гродненская обувная фабрика «Неман» (2,7 баллов в 2010 г.; 2 балла в 2012 г.). ЗАО «Сивельга» (3,5 балла в 2010 г., 2,9 баллов в 2012 г.), ЗАО СП «Белкельме» (3,1 балл в 2010 г. и 2,5 балла в 2012 г.).

Достаточно низкие оценки использования рыночного потенциала такого несомненного лидера в обувном производстве Республики Беларусь, как СООО «Белвест» связаны с тем обстоятельством, что данная организация имеет достаточно разветвленную и обширную сеть фирменной торговли в Российской Федерации, но данная деятельность по белорусскому законодательству не учитывается как экспортная. По этой причине происходит «искажение» действительного положения дел организации в экспортной деятельности.

Эффективность использования ресурсного потенциала организаций по производству обуви

можно признать высоким. Вместе с тем, одной из проблем большинства организаций по производству обуви является отсутствие в организационной структуре управления бюро, отделов, служб, бизнес-единиц, занимающихся внешнеэкономической деятельностью, в том числе экспортной. В основном эти функции выполняются отдельными сотрудниками, входящими в состав коммерческих отделов организаций.

Внешнюю эффективность использования экспортного потенциала организаций по производству обуви в целом по концерну «Беллегпром» можно признать высокой в 2010 и 2012 гг. и средней – в 2011 г. Доля экспорта обуви составляет практически половину общего объема ее производства в Республике Беларусь, то есть этот вид деятельности является экспортоориентированным.

Однако доля экспорта обуви в его общем объеме составляет всего 0,5 %. Негативное влияние на внешнюю эффективность использования экспортного потенциала организаций по производству обуви оказали значения коэффициентов покрытия экспортом импорта (86,46 % в 2010 г., 77,42 % в 2011 г. и 82,96 % в 2012 г.). С точки зре-

Таблица 4 – Система частных показателей для оценки эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви

Показатели	Алгоритм расчета	Характеристика показателя
1	2	2
<b>Показатели внутренней эффективности использования экспортного потенциала организации</b>		
Показатели, характеризующие использование ресурсного потенциала организации		
Коэффициент использования среднегодовой производственной мощности	$K_{пм} = ОПФ / Пм,$ где <b>ОПФ</b> – объем производства фактический, тыс. пар; <b>Пм</b> – производственные мощности, тыс. пар	Характеризует использование производственных мощностей организации (может быть использован при выявлении резервов роста производства продукции и соответственно экспорта)
Количество работников, выполняющих функции, связанные с экспортной деятельностью	Бизнес-единица, служба, отдел, бюро, отдельные сотрудники	Определяет наличие персонала в области экспортной деятельности
Показатели, характеризующие использование рыночного потенциала организации		
Доля экспорта в общем объеме производства продукции	$Дэ = Оэ / Опр,$ где <b>Оэ</b> – объем продукции, реализованной на экспорт млрд. руб., (тыс. пар); <b>Опр</b> – общий объем производства продукции, млрд. руб., (тыс.пар)	Характеризует экспортную ориентированность производства; чем выше данный показатель, тем более значимо экспортное направление для организации-экспортера
Доля продукции, поставляемой в страны дальнего зарубежья	$Дэдз = Оэдз / Оэ,$ где <b>Оэдз</b> – объем продукции, реализованный в страны дальнего зарубежья, долл. США, (млн. руб., нат. ед.)	Чем выше данный показатель, тем более значимо экспортное направление реализации продукции для организации-экспортера в страны дальнего зарубежья
Доля продукции, сертифицированной на соответствие международным стандартам или продукции со знаком соответствия требованиям таможенного союза	$Дсерт = Осерт / Опр,$ где <b>Осерт</b> – сертифицированная произведенная продукция, млн. руб., (тыс. пар) ; <b>Опр</b> – произведенная продукция, млн. руб., (тыс.пар)	Определяет экспортные возможности организации, т.к. во многие страны поставки могут осуществляться только при наличии международных сертификатов
Относительная конкурентоспособность обуви (на основе опроса зарубежных потребителей)	$Ко = К / К_{макс},$ где <b>К</b> – обобщающая оценка конкурентоспособности обуви, балл ( <i>методика расчета представлена в пункте 2.3.</i> ); <b>Кмакс</b> – максимальное значение размерности шкалы, балл	Отражает уровень конкурентоспособности товара. Чем ближе показатель к 1, тем более конкурентоспособен товар
Доля расходов на реализацию на внешних рынках в общих расходах на реализацию	$Дзобщ = Зр.вн / Зр.общ,$ где <b>Зр.вн</b> – сумма расходов на реализацию на внешних рынках, млрд. руб.; <b>Зр.общ</b> – общая сумма расходов на реализацию, млрд. руб.	Отражает долю расходов на реализацию на внешних рынках в общих расходах организации на реализацию, характеризует интенсивность маркетинговой и сбытовой деятельности организации на внешних рынках.



Продолжение таблицы 4

1	2	3
Показатели, характеризующие использование финансового потенциала организации		
Рентабельность продукции, реализованной на экспорт	$Rэ = Пэ / Сэ$ , где $Пэ$ – прибыль от реализации экспортируемой продукции, млн. руб.; $Сэ$ – себестоимость экспортируемой продукции, млн. руб.	Характеризует эффективность производства продукции, реализуемой на экспорт для организации-экспортера.
Доля прибыли от реализации экспорта в общем объеме прибыли от реализации организации экспортера	$Дпэ = Пэ / По$ , где $По$ – общая величина прибыли от реализации, млн. руб.	Показывает долю прибыли от реализации экспортируемой продукции в общей сумме прибыли от реализации продукции организации-экспортера; чем больше показатель, тем больше значимость экспорта для организации. Отражает влияние экспортной деятельности на формирование финансовых результатов организации.
Рентабельность продаж на внешнем рынке	$Rэпр = Пэ / Вэ$ , где $Пэ$ – выручка от реализации экспортируемой продукции, млн. руб.	Показывает прибыльность экспорта продукции; чем выше данный показатель, тем выгоднее экспорт продукции для организации-экспортера.
Темп роста экспорта	$Тр = Оэ_n / Оэ_{n-1}$ , где $Оэ_n$ – объем продукции, реализованной на экспорт в $n$ – ом периоде млн. руб., (тыс. долл. США, тыс. пар); $Оэ_{n-1}$ – объем продукции, реализованной на экспорт в предыдущем периоде, млн. руб., (тыс. долл. США, тыс. пар)	Отражает динамику экспортной деятельности организации. Положительная динамика имеет место при значении показателя больше 1
Показатели внешней эффективности использования экспортного потенциала организации		
Значимость экспорта обуви для экономики страны	$Кэи = Оэ.об / Опр.об$ , где $Оэ.об$ – объем экспорта обуви в стране, млн. долл. США (млн. руб., тыс. пар); $Опр.об$ – общий объем производства обуви в стране, млн. долл. США (млн. руб., тыс. пар)	Показывает долю экспорта в общем объеме производства обуви в стране
Экспортная специализация организации	$Кэсп = Оэ.об / Оэ.общ$ , где $Оэ.общ$ – общий объем экспорта в стране, млн. долл. США (млн. руб., тыс. пар)	Отражает долю экспорта обуви в общем объеме экспорта страны
Рыночная доля организации на внешнем рынке	$Др = Оэ / Оэ.об$ ,	Показывает долю экспорта организации в общем объеме экспорта страны по товарной группе
Коэффициент покрытия экспортом импорта	$Кп = Оэ / Ои$ , где $Ои$ – объем импортируемой продукции, млн. долл. США (млн. руб., тыс. пар)	Показывает, сколько рублей экспорта приходится на 1 рубль импорта. Чем выше данный показатель, тем эффективнее экспортная деятельность организации как на микро-, так и на мезо- и макроуровнях

Источник: собственная разработка.

Таблица 5 – Оценочные шкалы показателей эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви

Наименование показателя	Состояние показателя	Оценка, балл
1	2	3
Коэффициент использования среднегодовой производственной мощности	Более 90 % 70 – 90 % 60 – 70 % 50 – 60 % Менее 50 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)
Количество работников, выполняющих функции, связанные с экспортной деятельностью	Бизнес-единица Служба Отдел Бюро Отдельные сотрудники	5 (значительное) 4 (существенное) 3 (среднее) 2 (ниже среднего) 1 (несущественное)
Доля экспорта в общем объеме производства продукции	Более 45 % 30 – 45 % 20 – 30 % 10 – 20 % Менее 10 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Доля продукции, поставляемой в страны дальнего зарубежья	Более 20 % 15 – 20 % 10 – 15 % 5 – 10 % Менее 5 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Доля продукции, сертифицированной на соответствие международным стандартам или продукции со знаком соответствия требованиям таможенного союза	70 – 100 % 50 – 70 % 20 – 50 % 10 – 20 % Менее 10 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Относительная конкурентоспособность обуви (на основе опроса зарубежных потребителей)	0,8 – 1 0,6 – 0,8 0,4 – 0,6 0,2 – 0,4 0 – 0,2	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Доля расходов на реализацию на внешних рынках в общих расходах на реализацию	Более 60 % 45 – 60 % 30 – 45 % 15 – 30 % Менее 15 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Рентабельность продукции, реализованной на экспорт	Более 50 % 25 – 50 % 10 – 25 % 5 – 10 % Менее 5 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Доля прибыли от реализации экспорта в общем объеме прибыли от реализации организации экспортера	Более 45% 30 – 45% 20 – 30% 10 – 20% Менее 10%	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)
Рентабельность продаж на внешнем рынке	Более 30% 15 – 30% 5 – 15% 1 – 5 % Менее 1 %	5 (очень высокая) 4 (высокая) 3 (средняя) 2 (ниже среднего) 1 (низкая)

Продолжение таблицы 5

1	2	3
Темп роста экспорта	Более 130 % 110 – 130 % 100 – 110 % 70 – 100 % Менее 70 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)
Значимость экспорта обуви для экономики страны	Более 45 % 35 – 45 % 20 – 35 % 10 – 20 % Менее 10 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)
Экспортная специализация организации	Более 15 % 10 – 15 % 6 – 10 % 3 – 6 % Менее 3 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)
Рыночная доля организации на внешнем рынке	Более 10 % 5 – 10 % 1 – 5 % 0,1 – 1 % Менее 0,1 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)
Коэффициент покрытия экспортом импорта	Более 140 % 120 – 140 % 100 – 120 % 80 – 100 % Менее 80 %	5 (очень высокий) 4 (высокий) 3 (средний) 2 (ниже среднего) 1 (низкий)

Источник: собственная разработка на основе опроса экспертов.

Таблица 6 – Обобщающие и интегральный показатели оценки эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви

Показатели	Алгоритм расчета	Характеристика показателя
1	2	3
Обобщающий показатель, характеризующий использование ресурсного потенциала организации	$Орек = \alpha_{nm} \times K_{nm} + \alpha_{вэд} \times \mathbf{Ч}_{вэд},$ <p>где <math>\alpha_{nm}</math> – коэффициент значимости коэффициента использования мощности; <math>K_{nm}</math> – коэффициент использования производственной мощности, балл; <math>\alpha_{вэд}</math> – коэффициент значимости показателя наличия квалифицированных кадров в области экспортной деятельности; <math>\mathbf{Ч}_{вэд}</math> – показатель наличия квалифицированных кадров в области экспортной деятельности, балл</p>	Отражает совокупное использование ресурсов организации
Обобщающий показатель, характеризующий использование рыночного потенциала организации	$Ок. = \alpha_{дэ} \times D_э + \alpha_{эдз} \times D_{эдз} + \alpha_{серт} \times D_{серт} + \alpha_{ко} \times K_о + \alpha_{дэрасх} \times D_{эрасх},$ <p>где <math>D_э</math> – доля экспорта в общем объеме производства продукции, балл; <math>D_{эдз}</math> – доля продукции, поставляемой в страны дальнего зарубежья, балл; <math>D_{серт}</math> – доля продукции, сертифицированной по международным стандартам, балл; <math>K_о</math> – относительная конкурентоспособность обуви (на основе опроса зарубежных потребителей), балл; <math>D_{эрасх}</math> – доля расходов на реализацию на внешних рынках в общих расходах на реализацию, балл; <math>\alpha_{дэ}</math>, <math>\alpha_{эдз}</math>, <math>\alpha_{серт}</math>, <math>\alpha_{серт}</math>, <math>\alpha_{дэрасх}</math> – соответственно коэффициенты значимости показателей</p>	Характеризует использование рыночного потенциала организации

Продолжение таблицы 6

1	2	2
Обобщающий показатель, характеризующий использование финансового потенциала организации	$Oэфф. = \alpha_{рз} \times P_з + \alpha_{рзпр} \times P_{зпр} + \alpha_{днз} \times D_{нз} + \alpha_{тр} \times T_p,$ где $P_з$ – рентабельность продукции, реализованной на экспорт, балл; $D_{нз}$ – доля прибыли от реализации экспорта в общем объеме прибыли от реализации, балл; $P_{зпр}$ – рентабельность продаж на внешнем рынке балл; $T_p$ – темп роста экспорта, балл; $\alpha_{рз}, \alpha_{рзпр}, \alpha_{днз}, \alpha_{тр}$ – соответственно коэффициенты значимости показателей	Отражает общую экономическую эффективность экспортной деятельности организации
Обобщающий показатель внешнего экспортного потенциала	$Oвнеш. = \alpha_{кзн} \times K_{зн} + \alpha_{эсп} \times K_{эсп} + \alpha_{др} \times D_p + \alpha_{кп} \times K_n,$ где $K_{зн}$ – показатель значимости экспорта обуви для экономики страны, балл; $K_{эсп}$ – показатель экспортной специализации, балл; $D_p$ – показатель рыночной доли на внешнем рынке, балл; $K_n$ – коэффициент покрытия экспортом импорта, балл; $\alpha_{кзн}, \alpha_{эсп}, \alpha_{др}, \alpha_{кп}$ – соответственно коэффициенты значимости показателей	Комплексно характеризует экспортный потенциал организации-экспортера с учетом факторов внешней среды
Интегральный показатель эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви	$И = \sqrt[4]{O_{рес.} \times O_{к.} \times O_{эфф.} \times O_{внеш.}}$	Комплексно характеризует эффективность использования экспортного потенциала организации

Источник: собственная разработка.

Таблица 7 – Оценочная шкала эффективности использования экспортного потенциала организации по производству обуви

Оценка, балл	Эффективность использования экспортного потенциала
0 – 1	низкая
1 – 2	ниже среднего
2 – 3	средняя
3 – 4	высокая
4 – 5	очень высокая

Источник: собственная разработка.

ния используемых ресурсов, производство обуви является импортоориентированным. Так, в себестоимости продукции, произведенной в СООО «Белвест» и СООО «СанМарко», импорт составляет почти 70 %, в ОАО «Красный Октябрь» – более половины.

Значения интегральных показателей свидетельствуют о высокой эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви за период 2010 – 2012 гг. Наиболее эффективно экспорт-

ный потенциал используют: СООО «Марко», ОАО «Красный Октябрь», ЗАО СП «Отико», ЗАО «Сивельга». Эффективность использования экспортного потенциала ниже среднего значения за исследуемый период имеет место в таких организациях, как ОАО «Лидская обувная фабрика» (в 2010 г. – 1,69 балла) и МООАО «Луч» (в 2010 г. – 1,89 баллам) с тенденцией улучшения в 2011 – 2012 гг. Устойчивая динамика снижения эффективности использования экспортного потенциала наблюдается в ОАО «Грод-

*Таблица 8 – Обобщающие и интегральные показатели эффективности использования экспортного потенциала организаций по производству обуви*

Наименование организации	Обобщающий показатель внутренней эффективности использования экспортного потенциала, балл												Обобщающий показатель внешней эффективности экспортного потенциала, балл			Интегральный показатель эффективности экспортного потенциала, балл		
	Обобщающий показатель, характеризующий использование ресурсного потенциала				Обобщающий показатель, характеризующий использование рыночного потенциала				Обобщающий показатель, характеризующий использование финансового потенциала				2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
	2010 г.	2011 г.	2012 г.		2010 г.	2011 г.	2012 г.		2010 г.	2011 г.	2012 г.		2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
1. ОАО «Красный Октябрь»	3,1	3,1	4,5	3,1	3,1	4,5		4,5	4,5	3,7		3,2	2,4	2,6	3,66	3,06	3,46	
2. ОАО «Гродненская обувная фабрика «Неман»	2,4	3,1	3,6	3,1	3,6			3,6	3,6	2		2	2	2	2,16	2,15	1,97	
3. ОАО «Лидская обувная фабрика»	1	1	3	1	3			3	3	3,1		2	2,6	3	1,69	2,41	2,66	
4. ЗАО СП «Отико»	3,8	3,8	4	3,8	4			4	4	3,9		4	3	2,6	3,92	3,27	3,4	
5. ЗАО «Сивельга»	3,1	3,1	3,6	3,1	3,6			3,6	3,6	2,9		3,8	2,6	3,4	3,12	2,74	2,94	
6. ЗАО СП «Белкельме»	3,7	3,7	3,8	3,7	3,8			3,8	3,8	2,5		2,2	2,2	1,8	2,86	2,75	2,8	
7. ООО «Белвест»	3,7	3,7	3,2	3,7	3,2			3,2	3,2	2,5		2,4	2,2	3,8	3,19	2,85	2,83	
8. ООО «Марко»	3,8	3,8	4	3,8	4			4	4	4		3,4	3	2,6	3,73	3,23	3,72	
9. ЧП «СанМарко»	3,8	3,8	4	3,8	4			4	4	3,1		2,4	2,4	2,4	3,21	2,92	3,19	
10. МО ОАО «Луч» – управляющая компания холдинга	1,7	2,4	2,2	1,7	2,4	2,2		2,2	2,2	2,1		1,8	2	2	1,89	2,24	2,24	
<b>Итого по концерну</b>	<b>3,1</b>	<b>3,1</b>	<b>3,1</b>	<b>3,7</b>	<b>3,1</b>	<b>3,7</b>		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3,4</b>		<b>3,2</b>	<b>3</b>	<b>3,1</b>	<b>3,23</b>	<b>2,76</b>	<b>3,16</b>	

Источник: собственная разработка.

ненская обувная фабрика «Неман» (2,16 балла в 2010 г. и 1,97 балла в 2012 г.). Практически для всех исследуемых организаций в 2011 году характерно снижение эффективности использования экспортного потенциала, что обусловлено негативными последствиями кризисных явлений в экономике страны.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты апробации методики свидетельствуют о том, что она позволяет дать всестороннюю и однозначную оценку эффективности использования экспортного потенциала как отдельных организаций по производству обуви, так и в целом концерна «Беллегпром» и может быть использована как инструмент обоснования стратегии их экспортной деятельности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Швыдкий, В.В. (2010), Теория и практика формирования и реализации экспортного потенциала предприятий, *Известия КГТУ* (19), С. 67-73.
2. Круглов, В.С. (2006), *Формирование и использование экспортного потенциала промышленных предприятий*, Саратов, 19 с.
3. Дубков, С. (2013), Роль экспортного потенциала в социально-экономической системе, *Банковский вестник* (47), С. 40-43.
4. Сычев, М.С. (2012), *Развитие методического обеспечения анализа и оценки экспортного потенциала предприятия*, Йошкар-Ола, 20 с.
5. Дубков С., Дадалко С., Фоменок Д. (2011), Формирование и оценка экспортного потенциала промышленных предприятий, *Банковский вестник* (28), С. 29-35.
6. Мосейко В.О., Азмина Ю.М. (2012), Многофакторная оценка экспортного потенциала малых и средних предприятий региона, *Вестник Волгоградского государственного университета* (21), С.63-71.
7. Сидоренко, А.В. *Развитие экспортного потенциала как фактор повышения эффективности деятельности промышленных предприятий*. Самара, 30 с.

## REFERENCES

1. Shvydky, C.C. (2010), Theory and practice of formation and realization of the export potential of enterprises [Teoriya i praktika formirovaniya i realizacii exportnogo potenciala predpriyatij]. *News KSTU* (19), p. 67-73.
2. Kruglov, V.C. (2006), The formation and use of the export potential of industrial enterprises [Formirovanie i ispolzovanie exportnogo potenciala promishlennih predpriyatij]. Saratov: Saratov educat. soc.-econ.univ. 19 p.
3. Dubkov, S. (2013), The role of export potential in the socio-economic system [Role exportnogo potenciala v socialno-economicheskoy sisteme]. *Bank Bulletin* (47), pp. 40-43.
4. Sychev, M.S. (2012), Development of methodical support analysis and assessment of the export potential of the enterprise [Razvitie metodicheskogo obespecheniya analiza i ocnki exportnogo potenciala predpriyatiya]. Yoshkar-Ola, Russia: Volga educat. technologist. univ., 20 p.
5. Dubkov S., Dadalko S., Fomenok D. (2011), Formation and evaluation of export potential of industrial enterprises [Formirovanie i ocenka exportnogo potenciala promishlennih predpriyatij]. *Bank Bulletin* (28), pp. 29-35.

8. Чернавина, Н.А. (2007), Экспортный потенциал АПК Витебской области, *Организационно-правовые аспекты инновационного развития АПК* (1), С. 185-188.
6. The Moseiko С.О., Azmina Y.M. (2012), Multifactorial assessment of the export potential of small and medium enterprises in the region [Mnogofaktornaya ocenka exportogo potenciala malih I srednih predpriyatij regiona]. Vestnik of Volgograd state university (21), pp. 63-71.
7. Sidorenko, A.C. Development of export potential as a factor of increase of efficiency of activity of industrial enterprises [Razvitie exportnogo potenciala kak factor povisheniya effektivnosti deyatel'nosti promishlennih predpriyatij]. Samara: Samara state econ. univ., 30 p.
8. Chernavin, N.A. (2007), Export potential of the agricultural sector of the Vitebsk region [Exportniy potencial APK Vitebskoy oblasti]. Legal aspects of innovative development of agriculture (1), pp. 185-188.

*Статья поступила в редакцию 17.11.2014 г.*

## АЛЬТЕРНАТИВНАЯ СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИРЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗАЧЁТА КРЕДИТОРСКОЙ И ДЕБИТОРСКОЙ ЗАДОЛЖЕННОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

М.В. Половцев

УДК 658.14/17

## РЕФЕРАТ

*КРЕДИТОРСКАЯ И ДЕБИТОРСКАЯ ЗАДОЛЖЕННОСТИ, ВЗАИМОЗАЧЕТ ЗАДОЛЖЕННОСТИ, ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, СИМПЛЕКС-МЕТОД*

Статья посвящена актуальной проблеме кризиса неплатежей в Республике Беларусь и росту взаимных долгов между хозяйствующими субъектами. Проведен краткий анализ динамики кредиторской и дебиторской задолженностей, их влияния на финансовую устойчивость экономических субъектов. Предложен способ проведения безденежного внутриреспубликанского взаимозачета долгов, цель которого – снижение уровня кредиторской и дебиторской задолженностей. Инструментом практической реализации взаимозачета является сформулированная экономико-математическая модель линейного вида. Данная модель учитывает структуру и объемы долгов каждого участника и обеспечивает достижение поставленной цели на основе применения «симплекс-метода». Обоснована целесообразность участия бюджета, определена возможность учета государственных интересов при решении приоритетных социально-экономических задач.

## ABSTRACT

*ACCOUNTS PAYABLE AND RECEIVABLE, OFFSET OF DEBT, ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL, THE SIMPLEX METHOD*

Article is devoted to the problem of non-payments crisis in the Republic of Belarus and the growth of mutual debts between economic entities. The brief analysis of the dynamics of accounts payable and receivable and their impact on the financial stability of the economic agents is made.

A method of non-monetary intra-netting of debts, which aims at the reduction of accounts payable and receivable is proposed. The formulated economic-mathematical linear model is used as a tool for the practical implementation of the netting. This model takes into account the structure and the amount of each participant debt and ensures the achievement of the aim by the applying of «simplex method». The expediency of the budget engaging is defined, the possibility of taking into account the state interest addressing to social and economic problems is taken into consideration.

В настоящее время экономика Республики Беларусь испытывает весь комплекс отрицательных явлений кризиса неплатежей, среди которых: рост дебиторской и кредиторской задолженностей, вымывание оборотных средств, высокая закредитованность предприятий. Для наглядного представления масштаба и серьезности создавшегося положения с платежами можно привести величину соотношения совокупной дебиторской (кредиторской) задолженности и ВВП (таблица 1). Как видно из таблицы, в среднем около 30 % ВВП – это долговые обязательства, что, при прочих равных условиях, озна-

чает катастрофическую ситуацию с платежами внутри республики.

Взаимоотношения каждого хозяйствующего субъекта с внешней средой, его финансовая и экономическая политика неизбежно приводят к образованию дебиторской и кредиторской задолженностей между:

- предприятиями и организациями за поставленную продукцию, оказанные услуги и т. д.;
- бюджетом и хозяйствующими организациями по налогам, взносам на государственное социальное страхование и неналоговым платежам.



Таблица 1 – Соотношение дебиторской (кредиторской) задолженности и ВВП, %

Показатель	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Валовой внутренний продукт в текущих ценах, млрд. руб.	129791,0	137442,0	164476,0	297158,0	530356,0	636784,2
Отношение дебиторской задолженности к ВВП (на конец года)	24,1	31,0	30,1	36,0	29,2	30,8
Отношение кредиторской задолженности к ВВП (на конец года)	29,8	35,7	35,1	47,2	34,4	37,9

Источник: составлено по [1, 2, 4, 7].

- банками и реальным сектором экономики по кредитам и пр.;

Само по себе явление задолженности не является сугубо отрицательным: предоставление отсрочки, рассрочки платежей за свою продукцию, услуги, работы или иной актив, с одной стороны, отсрочка и рассрочка платежей в бюджет и за полученный товар, услуги, с другой стороны, позволяют организациям более гибко лавировать в сложном и динамичном мире современного бизнеса, сократить потребность в оборотном капитале. Негативное же влияние на финансовое состояние организаций оказывают среди прочих причин: низкая оборачиваемость дебиторской задолженности, невозможность погашать кредиторскую задолженность, как следствие, вымывание оборотных средств, снижение мобильности оперативной деятельности и скорости реагирования на изменения ситуации на рынках ресурсов, товаров и услуг, в итоге – сокращение эффективности хозяйствования. Это вызывает необходимость пополнения оборотного капитала за счет привлекаемых займов, что опять же увеличивает кредиторскую задолженность.

Именно такая тяжелая и напряженная ситуация в расчетах между хозяйствующими субъектами, банками, бюджетом, а также с нерезидентами складывается в Республике Беларусь и требует своего скорейшего адекватного разрешения (рисунок 1). Так, за 2008 – 2013 гг. дебиторская и кредиторская задолженности выросли в 1,7 раза, девальвация национальной валюты в 2011 г. хотя и обеспечила сокращение их уровней, но стабильного результата не

принесла – рост долгов продолжился в 2012 – 2013 гг. Сокращение удельных весов просроченных кредиторской и дебиторской задолженностей с 2008 до 2011 гг. относится к положительным явлениям, но дальнейшее их увеличение с 2011 по 2013 гг. при одновременном росте объемов кредиторской и дебиторской задолженностей отражает лавинообразный характер накопления долгов.

На законодательном уровне предложены различные возможности реструктуризации кредиторской и дебиторской задолженностей организаций (далее – частного долга): факторинг, перевод долга, пролонгация срока исполнения обязательств и т. д. Все они имеют «финансово-юридическую» природу и, в силу возрастания трудоемкости обработки и значительного документооборота при увеличении числа заинтересованных субъектов, редко выходят за рамки применения для двух-трех юридических лиц. Таким образом, реструктуризация долгов происходит только на микроуровне и ее влияние на снижение общего совокупного долга (как суммы частных долгов) по республике оказывается минимальным, неощутимым для кардинального исправления ситуации. Очевидно, что назрела необходимость решения данной проблемы на макроуровне.

Следует отметить, что ранее попытки снижения совокупного долга предпринимались в 2002 г. и 2005 г., когда на республиканском уровне было принято решение о проведении внутривнутриреспубликанского зачета кредиторской и дебиторской задолженностей. По результатам оба зачета признаны крайне неудовлетвори-

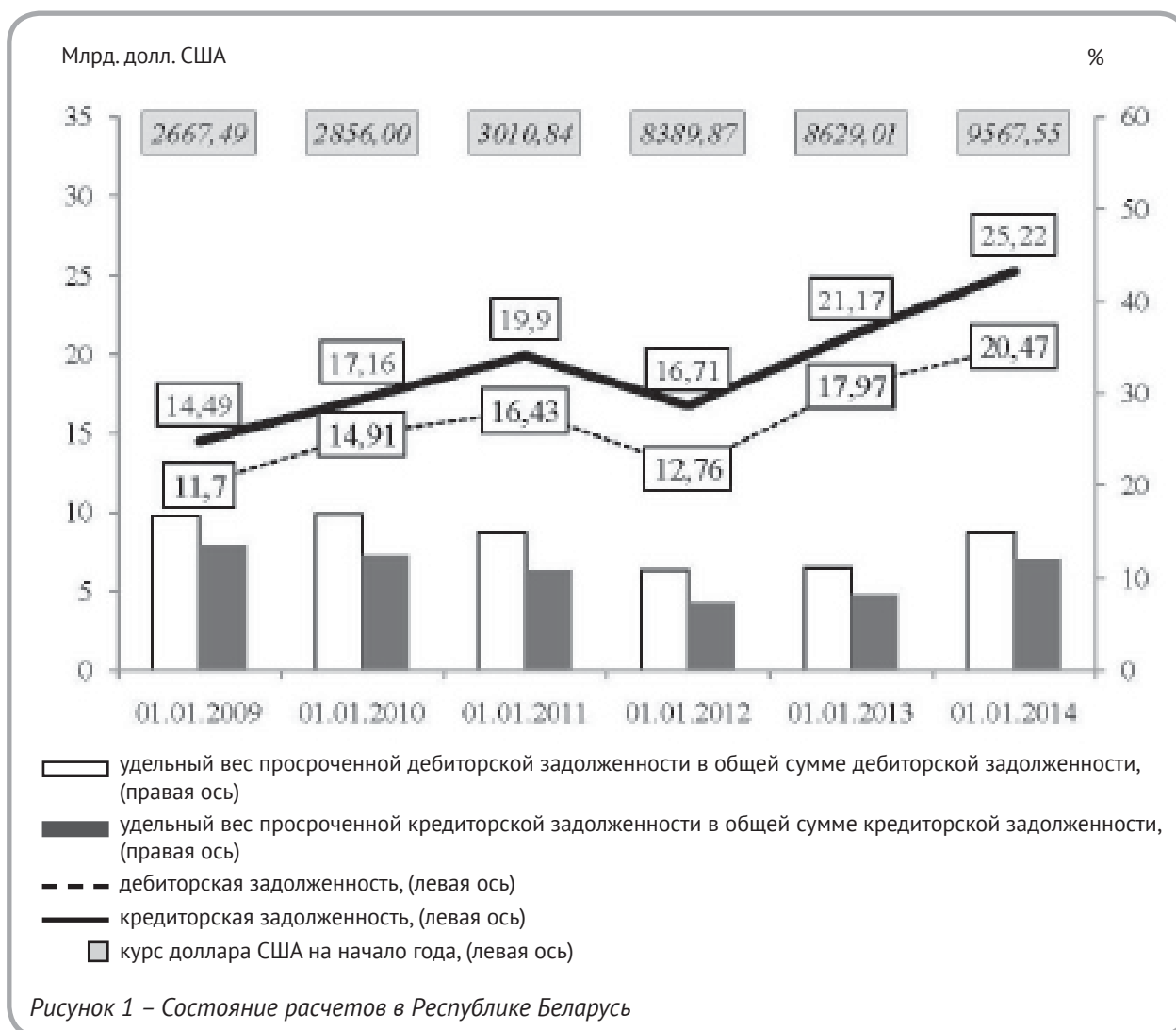


Рисунок 1 – Состояние расчетов в Республике Беларусь

Источник: составлено по [2, 3, 4, 9]

тельными, поскольку снижение суммарной задолженности составило всего 0,5 % и 5,9 % от общей суммы в 2002 г. и 2005 г. соответственно. [5] Общим недостатком проводимых зачетов были: высокая трудоемкость процессов обработки данных, проводимых в нескольких местах одновременно, ранжирование организаций по приоритетности, некоторые организационные моменты, в частности бумажный документооборот, ручной счет.

Нами предлагается альтернативная схема проведения внутривнутриреспубликанского зачета по снижению совокупного долга с помощью практико-ориентированной экономико-математической модели. Её отличительными особенностями являются: простота и скорость реализации, возможность максимально полного охвата числа

экономических субъектов и централизации работ. Прежде всего, в целях наиболее эффективного и скорейшего снижения совокупного долга необходимо сконцентрировать воздействующие усилия на весь его объем одновременно с исключением документооборота между участниками до получения результатов.

Очевидно, что каждый элемент системы экономических взаимоотношений способен выступать в равной степени как должник и как кредитор, поэтому величину совокупного долга, структуру и систему его образования можно легко описать в виде матрицы, по строкам которой указываются должники, по столбцам – кредиторы, в ячейках – величины долга, а совокупный долг – это алгебраическая сумма величин по всем ячейкам матрицы (или, что является экви-

валентом, – сумма частных долгов). В качестве основы важно принять следующее равенство: в бухгалтерском балансе субъекта А кредиторская задолженность субъекта А контрагенту Б численно равна в бухгалтерском балансе субъекта Б дебиторской задолженности контрагентом А субъекту Б. Учитывая, что на практике такое равенство наблюдается только по позициям, подтвержденным бухгалтерскими актами сверки, в целях снижения совокупного долга можно рассматривать наименьшую из этих величин.

Понятно, что при уменьшении величины каждой ячейки уменьшается общая сумма частных долгов, но для решения проблемы совокупного долга важно не столько само изменение величины в каждой ячейке матрицы, сколько изменение их суммы, с учетом определенных соотношений и ограничений между ними, обусловленных «экономической природой» совокупного долга. Поэтому, с нашей точки зрения, к проблеме уменьшения величины совокупного долга необходимо подходить с позиции управляющего воздействия, то есть посредством указания направления и характера изменения его величины до экономически обоснованного уровня, и решать данную задачу математическими методами.

Необходимо отметить, что российский автор Н.Н. Калиткин еще в 1995 г. в своих работах по моделированию решения задачи зачета взаимных долгов (совокупного долга) показал основную идею и важность такого зачета на макроуровне [6]. Критерий оптимальности им изначально был сформулирован в следующей форме:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{(x_{nm} - y_{nm})^2}{\rho_n^2} = \min, \quad (1)$$

где  $x_{nm}$  – долг  $m$ -го экономического субъекта  $n$ -му экономическому субъекту, при этом  $x_{nm} = -x_{mn}$ ;  $y_{nm}$  – изменение каждого долга при взаимозачете;  $\rho_n$  – характерный финансовый вес  $n$ -го экономического субъекта;  $N$  – количество участников системы.

Однако выполненная им математическая формализация задачи имеет определенные спорные моменты.

1. Допущение о том, что долг А перед Б

равен отрицательному долгу Б перед А, которое сделано в целях представления матрицы долгов в более «удобном» виде. В результате решения при начальной дебиторской задолженности в итоге может появиться кредиторская задолженность и наоборот. Это недопустимо, поскольку противоречит самому экономическому содержанию долга, а также предполагает использование кредита банков.

2. Установка приоритетности (важности) экономических субъектов: крупный субъект имеет приоритет перед малым, большая величина долга – перед меньшей. С нашей точки зрения, величина долга и размер экономического субъекта не могут влиять на приоритетность в решении задачи снижения совокупного долга, поскольку для достижения минимального уровня совокупного долга важным является количество взаимосвязей между участниками зачета.

В силу сделанных допущений, Н.Н. Калиткин для вычислений вынужден был использовать метод Лагранжа. В результате простая, в принципе, задача линейного программирования была сведена к задаче нелинейного программирования, что существенно осложнило ее практическую реализацию. При этом сделанные автором допущения не являются принципиальными для моделирования задачи снижения совокупного долга и в разработанной нами модели не используются. По нашему мнению, матрица данных и целевая функция линейного вида достаточно полно и адекватно моделируют задачу снижения совокупного долга и поэтому решение возможно на основе методов линейного программирования.

Предлагаемый подход основан на использовании хорошо известного «симплекс-метода». В соответствии с ним задаются линейного вида целевая функция от некоторого количества переменных (плана задачи), стремящаяся к своему экстремуму, и система линейных ограничений, накладываемых на эти переменные. [9] При этом, если набор значений переменных в результате вычислений удовлетворяет системе ограничений и определяет для целевой функции экстремальное значение, то его называют оптимальным планом. Таким образом, «симплекс-метод» предполагает не перебор возможных вариантов решения, а последовательное улучшение плана от опорного к оптимальному:

1. Отыскание начального опорного плана;
2. Проверка наличия признака оптимальности опорного плана;
3. Переход к нехудшему опорному плану.

В результате вычислений нехудший опорный план признается оптимальным, если его дальнейшее улучшение невозможно.

Следовательно, применение «симплекс-метода» как инструмента проведения внутривнутриреспубликанского зачета предполагает использование в качестве целевой функции величину совокупного долга, стремящегося к минимуму:

$$F = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x_{ij} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $F$  – величина совокупного долга;  $x_{ij}$  – новая величина задолженности  $i$ -го должника  $j$ -му кредитору;  $N$  – количество должников;  $M$  – количество кредиторов;

В качестве базовых ограничений принимаются следующие:

- все переменные неотрицательны:  $x_{ij} \geq 0$  для всех  $x$ ;
- для каждого  $x$  необходимо соблюдать условие  $x_{ij} \leq d_{ij}$ , где  $d_{ij}$  – первоначальный долг кредитору;
- общая сумма по строкам равна общей сумме по столбцам, что и составляет совокупный долг.

В определенных целях можно вводить дополнительные ограничения, исходя из целесообразности воздействия на величину долга конкретного должника или кредитора. При постановке задачи имеет место только одно допущение: к взаимному зачету принимается минимальная величина встречных требований.

Результат вычислений представляет собой матрицу, размерностью равной исходной, где в каждой ячейке находится новое значение долга, соответствующее задаче минимизации целевой функции, и само значение целевой функции – новая величина совокупного долга. Адекватность результатов расчетов определяется качеством используемой для вычислений информации и правильностью составления системы ограничений.

Для наглядности приведем условный пример. Пусть в проведении взаимозачета участвуют 5 субъектов хозяйствования, при этом субъект хозяйствования А должен субъектам Б и Д по 2 и 5 денежных единиц (далее – д. е.) соответственно, субъект Б должен субъектам В и Г по 4 и 8 д. е., субъект В должен субъектам А, Г и Д по 1, 7 и 4 д. е., субъект Г должен субъектам А и Б по 8 и 3 д. е., субъект Д должен субъекту Г 2 д. е. Данная информация сведена в матрицу совокупного долга размерностью 5x5, где по столбцам отражены кредиторы, по строкам – должники, в ячейках – частный долг кредитору. Совокупный долг равен 44 д. е. (таблица 2).

Исходя из поставленных целей и потребностей дальнейшего использования, задача снижения совокупного долга может формализоваться в двух видах моделей:

1. Стандартная – модель, предусматривающая использование в расчетах только базовых ограничений. В результате расчетов совокупный долг принимает строго математическое минимальное значение, в данном примере – 24 д. е., а исходная матрица будет иметь следующий вид (таблица 3).

2. Расширенная – модель, предусматривающая использование дополнительных огра-

Таблица 2 – Исходная матрица

Кредитор Должник	А	Б	В	Г	Д	Итого
А	0	2	0	0	5	7
Б	0	0	4	0	8	12
В	1	0	0	7	4	12
Г	8	3	0	0	0	11
Д	0	0	0	2	0	2
Итого	9	5	4	9	17	44

ничений для организаций, бюджета, отрасли в целях решения определенных социально-экономических задач. Так, пусть допустимый долг субъекта Г перед субъектом А может составлять 6 д. е., а долг субъекта Б перед субъектом Д не должен превышать 6,5 д. е. Тогда в результате расчетов совокупный долг уменьшится до 26 д. е., а матрица совокупного долга будет иметь вид (таблица 4).

Понятно, что введение дополнительных ограничений накладывает на структуру образования совокупного долга определенные рамки, поэтому целевая функция стремится к своему минимуму, отличному, в общем случае, от минимума при стандартной модели. Тем не менее, использование расширенной модели оправдано при решении приоритетных государственных задач.

Практическая реализация модели требует подготовительных действий:

- отсев участников, у которых существует только один вид задолженности;
- отсев участников, которые не являются ни должниками, ни кредиторами в отношении других участников взаимозачета;
- отсев неподтвержденных сумм задол-

женности.

В целях реализации данного подхода на практике предлагается создать рабочую комиссию по проведению внутриведомственного зачета совокупного долга на базе трех ведомств: Министерства экономики, Министерства финансов и Национального банка Республики Беларусь. Субъекты хозяйствования, как участники системы зачета, должны будут предоставить данные по долгам каждого своего контрагента. В качестве идентификационного номера в системе целесообразно использовать УНН. Создание интернет-ресурса, с помощью которого участники зачета будут вносить и корректировать свои данные, значительно ускорит и упростит осуществление взаимозачета. После проведения вычислений и формирования сводного отчета каждый участник получит индивидуальный отчет о структуре долгов по каждому контрагенту. При этом данный документ должен признаваться налоговыми органами как основание для списания задолженности и внесения корректировок в бухгалтерскую отчетность организации.

В целях более полного охвата участников зачета и снижения величины совокупного дол-

Таблица 3 – Матрица стандартной модели

Должник \ Кредитор	А	Б	В	Г	Д	Итого
А	0	0	0	0	3,25	3,25
Б	0	0	0	0	7,75	7,75
В	1	0	0	3	4	8
Г	4,25	0,75	0	0	0	5
Д	0	0	0	0	0	0
Итого	5,25	0,75	0	3	15	24

Таблица 4 – Матрица расширенной модели

Должник \ Кредитор	А	Б	В	Г	Д	Итого
А	0	0	0	0	4,5	4,5
Б	0	0	0,5	0	6,5	7
В	0,5	0	0	4	4	8,5
Г	6	0	0	0	0	6
Д	0	0	0	0	0	0
Итого	6,5	0	0,5	4	15	26

га возможно предусмотреть участие бюджета, который может оказывать государственную поддержку субъектам хозяйствования: за январь–сентябрь 2013 г. размер возмещения части процентов за пользование банковскими кредитами и финансовая помощь за счет республиканского бюджета составил 2097,5 млрд. руб. [8], или 129,2 % к соответствующему периоду 2012 г.

В целом для получения максимального эффекта при организации внутриреспубликанского зачета необходимо учитывать, что совокупный долг формируется по сложным цепочкам его возникновения между различными институциональными единицами и уровнями хозяйствования. Поэтому для наиболее эффективного снижения совокупного долга необходимо рассматривать все факторы его возникновения во всех их комбинациях и сочетаниях, а механизм уменьшения совокупного долга должен предусматривать максимально возможный охват участников, даже если это изначально не так очевидно.

Поскольку разработанная экономико-математическая модель создана на основе матрицы и вычисления проводятся с использованием хорошо проработанных методов линейного математического программирования, то точность

расчетов основывается на строгих математических соотношениях. Несмотря на то, что для наилучшего эффективного результата расчета необходимо увеличить размерность матрицы до максимально возможного уровня, скорость вычислений будет достаточно высокой в силу простоты и разработанности алгоритма вычислений на основе «симплекс-метода».

Таким образом, предложенная схема реализации внутриреспубликанского зачета совокупного долга с использованием практико-ориентированной экономико-математической модели может стать действенным государственным инструментом для решения существующих проблем в сфере расчетов между субъектами хозяйствования, бюджетом и финансовыми организациями. Перспективным видится использование методов нелинейного программирования, которые значительно расширяют возможности экономико-математического моделирования, но и требуют особых вычислительных мощностей ввиду специфики вида целевой функции, ограничений и их комбинации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Производство валового внутреннего продукта* (2014), доступно на: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/gross.php> (доступ 10 марта 2014).
2. *Состояние расчетов в Республике Беларусь* (2014), доступно на: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/finance1.php> (доступ 10 марта 2014).
3. *Средний официальный курс белорусского рубля по отношению к иностранным валютам* (2014), доступно на: <http://www.nbrb.by/statistics/Rates/AvgRate> (доступ:

## REFERENCES

1. *Proizvodstvo valovogo vnutrennego produkta* [The production of gross domestic product], (2014), available at: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/gross.php> (accessed 10 March 2014).
2. *Sostojanie raschetov v Respublike Belarus'* [The status of settlements in the Republic of Belarus], (2014), available at: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/finance1.php> (accessed 10 March 2014).
3. *Srednij oficial'nyj kurs belorusskogo rublja po otnosheniju k inostrannym valjutam* [An

10 марта 2014).

4. *О состоянии расчетов организаций Республики Беларусь на 1 января 2014 г.* (2014), доступно на: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/accounts.php> (доступ 12 марта 2014).
  5. *По итогам внутреспубликанского зачета задолженности погашено ...* (2014), доступно на: <http://afn.by/news/i/69095> (доступ 10 марта 2014).
  6. Калиткин, Н.Н. (2014), Оптимальный взаимозачет долгов предприятий, *Математическое моделирование*, 1995, том 7, выпуск 1, С. 11 – 21.
  7. *О валовом внутреннем продукте Республики Беларусь в 2013 году* (2014), доступно на: [http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/gdp\\_rgdp.php](http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/gdp_rgdp.php) (доступ 11 марта 2014).
  8. *Сведения о государственной поддержке, оказанной юридическим лицам за счет средств Республиканского Бюджета* (2014), доступно на: [http://www.minfin.gov.by/budget\\_execution/info\\_state\\_support](http://www.minfin.gov.by/budget_execution/info_state_support) (доступ 11 марта 2014).
  9. Кузнецов, А.В. (1994), *Высшая математика. Математическое программирование*, Минск, Высшейшая школа, 286 с.
- average official exchange rate of the Belarusian ruble to foreign currencies], (2014), available at: <http://www.nbrb.by/statistics/Rates/AvgRate> (accessed 10 March 2014).
  4. *O sostojanii raschetov organizacij Respubliki Belarus' na 1 janvarja 2014 g.* [On the settlement status of organizations in Belarus on 1 January 2014], (2014), available at: <http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/accounts.php> (доступ 12 марта 2014).
  5. *Po itogam vnutriguespublikanskogo zacheta zadolzhennosti pogasheno ...* [According to the results of intra republic offsetting debt repaid...], (2014), available at: <http://afn.by/news/i/69095> (accessed 10 March 2014).
  6. Kalitkin, N.N. (2014), Optimal canceling of mutual debts fracturing [Optimal'nyj vzaimozachet dolgov predpriyatij], *Matematicheskoe modelirovanie - Mathematical modeling*, 1995, vol. 7, issue 1, pp. 11 – 21.
  7. *O valovom vnutrennem produkte Respubliki Belarus' v 2013 godu* [On the gross domestic product of the Republic of Belarus in 2013], (2014), available at: [http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/gdp\\_rgdp.php](http://belstat.gov.by/homep/ru/indicators/pressrel/gdp_rgdp.php) (accessed 11 March 2014).
  8. *Svedenija o gosudarstvennoj podderzhke, okazanoj juridicheskim licam za schet sredstv Respublikanskogo Bjudzheta* [Information on the state support provided to legal entities at the expense of the republican budget], (2014), available at: [http://www.minfin.gov.by/budget\\_execution/info\\_state\\_support](http://www.minfin.gov.by/budget_execution/info_state_support) (accessed 11 March 2014).
  9. Kuznetsov, A.V. (1994), *Vysshaja matematika. Matematicheskoe programmirovanie* [Higher Mathematics. Mathematical programming], Minsk, Vusheyshaya shkola, 286 p.

Статья поступила в редакцию 31. 11. 2014 г.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

<b>Ажаронак Виктор Васильевич</b>	– кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси
<b>Алексеев Игорь Сергеевич</b>	– доцент кафедры «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», Витебский государственный технологический университет
<b>Андриянова Ольга Михайловна</b>	– ассистент кафедры «Экономика», Витебский государственный технологический университет
<b>Бизюк Андрей Николаевич</b>	– ассистент кафедры «Информатика», Витебский государственный технологический университет
<b>Бондарева Елена Владимировна</b>	– ассистент кафедры «Конструирование и технология одежды», магистр технических наук, Витебский государственный технологический университет
<b>Брайкова Алла Мечиславовна</b>	– доцент, кандидат химических наук, доцент кафедры «Физикохимия материалов», Белорусский государственный экономический университет
<b>Бублиенко Наталия Александровна</b>	– доцент кафедры биохимии и экологического контроля, кандидат технических наук, Национальный университет пищевых технологий
<b>Витязь Петр Александрович</b>	– академик, доктор технических наук, руководитель аппарата Президиум Национальной академии наук Беларуси
<b>Голубкова Валентина Тимофеевна</b>	– декан художественно-технологического факультета, кандидат технических наук, Витебский государственный технологический университет
<b>Горанский Георгий Георгиевич</b>	– ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
<b>Григорьева Татьяна Федоровна</b>	– доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук
<b>Грот Дмитрий Владимирович</b>	– аспирант, лаборант кафедры «Машины и аппараты лёгкой промышленности», Витебский государственный технологический университет



<b>Дорошенко Илья Андреевич</b>	– аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Дубина Александр Валентинович</b>	– аспирант кафедры «Промышленная экология», Белорусский государственный технологический университет
<b>Дягилев Андрей Степанович</b>	– докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика», Витебский государственный технологический университет
<b>Жерносек Сергей Васильевич</b>	– аспирант, ассистент кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Жорник Виктор Иванович</b>	– доктор технических наук, заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвёрдых материалов, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
<b>Касаева Тамара Васильевна</b>	– кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Экономика», Витебский государственный технологический университет
<b>Квасникова Вера Владимировна</b>	– кандидат экономических наук, доцент кафедры «Коммерческая деятельность», Витебский государственный технологический университет
<b>Ковалева Светлана Анатольевна</b>	– старший научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
<b>Кириллов Алексей Геннадьевич</b>	– кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты лёгкой промышленности», Витебский государственный технологический университет
<b>Коган Александр Григорьевич</b>	– доктор технических наук, профессор кафедры «Прядение натуральных и химических волокон», Витебский государственный технологический университет
<b>Кузнецов Андрей Александрович</b>	– доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Витебский государственный технологический университет
<b>Левшицкая Ольга Романовна</b>	– старший преподаватель кафедры «Коммерческая деятельность», Витебский государственный технологический университет

<b>Луд Николай Григорьевич</b>	– доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой онкологии, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет
<b>Марущак Алексей Сергеевич</b>	– студент механико-технологического факультета, Витебский государственный технологический университет
<b>Марцуль Владимир Николаевич</b>	– заведующий кафедрой «Промышленная экология», Белорусский государственный технологический университет
<b>Матвейко Николай Петрович</b>	– доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физикохимия материалов производственных технологий», Белорусский государственный экономический университет
<b>Надёжная Наталья Леонидовна</b>	– кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Витебский государственный технологический университет
<b>Назаренко Екатерина Валерьевна</b>	– магистр технических наук, аспирант кафедры «Прядение натуральных и химических волокон», Витебский государственный технологический университет
<b>Окунев Роман Владимирович</b>	– аспирант, ассистент кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Ольшанский Анатолий Иосифович</b>	– кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Ольшанский Валерий Иосифович</b>	– кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Парманчук Вера Владимировна</b>	– аспирант, ассистент кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Поболь Алексей Игоревич</b>	– аспирант, Белорусский национальный технический университет
<b>Половцев Максим Владимирович</b>	– младший научный сотрудник, НИЭИ Министерства экономики Республики Беларусь

<b>Посканная Екатерина Сергеевна</b>	– младший научный сотрудник, Витебский государственный технологический университет
<b>Пятов Владислав Владимирович</b>	– доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», Витебский государственный технологический университет
<b>Рыклин Дмитрий Борисович</b>	– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прядение натуральных и химических волокон», Витебский государственный технологический университет
<b>Савенок Владимир Евгеньевич</b>	– кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и промэкология», Витебский государственный технологический университет
<b>Садовский Виктор Васильевич</b>	– доктор технических наук, профессор, первый проректор, Белорусский государственный экономический университет
<b>Сакевич Валерий Николаевич</b>	– доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механика», Витебский государственный технологический университет
<b>Семёнова Елена Ивановна</b>	– кандидат технических наук, доцент кафедры «Биохимия и экологический контроль», Национальный университет пищевых технологий
<b>Соколов Сергей Владимирович</b>	– магистр технических наук, инженер АСУП, УП «Полимерконструкция»
<b>Сункуев Борис Семёнович</b>	– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты лёгкой промышленности», Витебский государственный технологический университет
<b>Талако Татьяна Леонидовна</b>	– кандидат технических наук, ГНУ «Институт порошковой металлургии»
<b>Ульянова Наталья Вячеславовна</b>	– магистр технических наук, аспирант кафедры «Прядение натуральных и химических волокон», Витебский государственный технологический университет
<b>Фалюшина Ирина Петровна</b>	– кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси
<b>Хина Борис Борисович</b>	– доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси

<b>Царюк Татьяна Яковлевна</b>	– кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси
<b>Чарковский Александр Владимирович</b>	– кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология трикотажного производства», Витебский государственный технологический университет
<b>Шилофост Татьяна Александровна</b>	– аспирант кафедры «Биохимия и экологический контроль», Национальный университет пищевых технологий (Украина)
<b>Шляхтунов Евгений Александрович</b>	– кандидат медицинских наук, доцент кафедры онкологии, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет
<b>Ясинская Наталья Николаевна</b>	– кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия», Витебский государственный технологический университет

# ПАМЯТКА АВТОРАМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

1. Научно-технический журнал «Вестник Витебского государственного технологического университета» выходит два раза в год. К печати допускаются статьи по трем тематическим направлениям:

- технология и оборудование легкой промышленности и машиностроения;
- химическая технология и экология;
- экономика.

2. Рукописи, направляемые в журнал, должны являться оригинальным материалом, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

3. К рукописи статьи необходимо приложить следующие материалы:

- заявку с названием статьи, тематическим направлением (из п. 1), к которому она подается, списком авторов и их личными подписями. В заявке необходимо указать согласие авторов на размещение полного текста статьи на сайтах журнала «Вестник ВГТУ» (<http://vestnik.vstu.by/rus/>) и Научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru/>);

- реферат на языке оригинала объемом не менее 10 строк (не менее 100 – 250 слов) – на русском или белорусском языке. Реферат оформляется по ГОСТ 7.9 – 95, включает ключевые слова и следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему и цель работы, метод или методологию проведения работы, результаты работы, область применения результатов, выводы. Последовательность изложения содержания статьи может быть изменена. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата;

- авторскую аннотацию (abstract) и название статьи – на английском языке. Аннотация призвана выполнять функцию независимого источника информации, должна быть информативной, оригинальной, то есть не дублировать текст реферата, структурированной; объем аннотации должен составлять 100 – 250 слов;

- сопроводительное письмо от организации, где выполнялась работа, или выписку из протокола заседания кафедры (для авторов, являющихся сотрудниками ВГТУ);

- экспертное заключение о возможности опубликования представленных материалов в открытой печати;

- справку, содержащую сведения об авторах (место работы, должность, ученая степень, адрес, телефон, e-mail) – на русском и английском языках. Требуется также указывать транслитерированное (с использованием букв латинского алфавита) название места работы автора, которое можно получить, воспользовавшись бесплатной программой транслитерации русского языка в латиницу на сайте <http://www.translit.ru/>;

- электронный вариант всех материалов, кроме сопроводительного письма (выписки из протокола заседания кафедры) и экспертного заключения.

4. Структура принимаемых к опубликованию статей следующая: индекс УДК; название статьи; фамилии и инициалы авторов; текст статьи; список использованных источников.

5. В тексте статьи должны быть последовательно отражены: состояние проблемы до начала ее изучения авторами; цель представленной работы и задачи, которые были решены для ее достижения; методика проведенных исследований; анализ полученных результатов, их научная новизна и практическая ценность; выводы. Полученные результаты должны быть обсуждены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. В выводах должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения. При необходимости должны быть также указаны границы применимости полученных результатов.

6. Список использованных источников оформляется отдельно в конце статьи; ссылки на публикации должны быть вставлены в текст в виде номера публикации в списке, заключенного в квадратные скобки. Ссылки на неопубликованные работы (диссертации, отчеты, депонированные рукописи) не допускаются. В библиографическом описании источника указываются фамилии и инициалы всех авторов, год издания (в круглых скобках), название источника (для статей – название журнала курсивом), номера страниц. Каждый источник должен иметь автора. Если упоминается сборник под редакцией, то в качестве автора указывается первый из ре-

дакторов. Если работа выполнена коллективом организации и конкретные авторы не указаны, в качестве автора указывается организация.

Если использованный источник опубликован не на английском языке, его библиографическое описание необходимо привести на языке оригинала и дополнить переводом на английский язык и транслитерацией всей указываемой в описании информации.

Примеры перевода и транслитерации библиографического описания (оформление соответствует требованиям, описанным выше для русскоязычного описания) приведены в таблицах.

Характеристика источника	Рекомендации по составлению пристатейных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard reference system)
Книга	Nenashev, M.F. (1993), <i>Poslednee pravitelstvo SSSR</i> [Last government of the USSR], Moscow, Krom Publ., 221 p. Kanevskaya, R.D. (2002), <i>Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov</i> [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development], Izhevsk, 140 p.
Статья из журнала	Zagurenko, A.G., Korotovskikh, V.A., Kolesnikov, A.A., Timonov, A.V., Kardymon, D.V. (2008), Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing [Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizaina gidrorazryva plasta], <i>Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry</i> , 2008, № 11, pp. 54-57.
Статья из электронного журнала	Swaminathan, V., Lepkoswka-White, E., Rao, B.R. (1999), Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange, <i>Journal of Computer-Mediated Communication</i> , Vol. 5, № 2, available at: <a href="http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/">www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/</a> .
Материалы конференции	Usmanov, T.S., Gusmanov, A.A., Mullagalina, I.Z., Muhametshina, R. Ju., Svechnikov, A.V. (2007), Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing [Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta], New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact, <i>Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Technological Symposium</i> , Moscow, 2007, pp. 267-272.
Электронные источники	APA Style (2011), available at: <a href="http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx">http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx</a> (accessed 5 February 2011). Pravila Tsicirovaniya Istochnikov [Rules for the Citing of Sources], (2011), available at: <a href="http://www.scribd.com/doc/1034528/">http://www.scribd.com/doc/1034528/</a> (accessed 7 February 2011).

Характеристика источника	Рекомендации по оформлению русскоязычного библиографического описания
Книга	Ненашев, М.Ф. (1993), <i>Последнее правительство СССР</i> , Москва, Кром, 221 с. Каневская, Р.Д. (2002), <i>Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов</i> , Ижевск, 140 с.
Статья из журнала	Загуренко, А.Г., Коротовских, В.А., Колесников, А.А., Тимонов, А.В., Кардымон, Д.В. (2008), Технико-экономическая оптимизация дизайна гидроразрыва пласта, <i>Нефтяное хозяйство</i> , 2008, № 11, С. 54-57.
Материалы конференции	Усманов, Т.С., Гусманов, А.А., Муллагалин, И.З., Мухаметшина, Р. Ю., Свечников, А.В. (2007), Особенности проектирования разработки месторождений с применением гидроразрыва пласта, Новые ресурсосберегающие технологии недропользования и повышения нефтегазоотдачи, <i>Труды 6-го Международного технологического симпозиума</i> , Москва, 2007, С. 267-272.

Также подробные рекомендации по составлению приставных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard reference system) практически для всех видов публикаций даны на сайте <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>.

7. Оформление статьи должно удовлетворять следующим требованиям:

- статьи подаются на русском, белорусском или английском языке;
- объем публикации должен составлять от 14 000 до 22 000 печатных знаков (4–10 страниц), набранных шрифтом Times New Roman 12, с полями по 20 мм на сторону и одинарным межстрочным интервалом;
- в файлах не должно быть макросов, колонтитулов и других сложных элементов форматирования;
- исключается автоматическая или ручная расстановка переносов;
- формулы набираются в прикладной программе Microsoft Equation 3.0, входящей в состав MS Office 2007, Times New Roman 12 полужирный курсив. Межстрочный интервал перед строкой формул составляет от 6 до 10 пт.;
- таблицы располагаются после первого упоминания в тексте. При этом они не должны дублировать сведения, отображенные на графиках.

Заголовки таблиц располагаются по центру страницы. Табличные данные – по центру или выравниваются по левому краю. Шрифт – Times New Roman чёрный от 9 до 12 пт. Заливка не используется;

- иллюстрации располагаются после первого упоминания о них в тексте. Каждая иллюстрация должна иметь подрисовочную надпись (Times New Roman, 11 пт). Графики и диаграммы представляются как рисунки, выполняются в графическом редакторе, совместимым с MS Word. Для названия осей координат и указания их размерности применяют шрифт Times New Roman от 9 до 11 пт. Фотографии должны иметь контрастное черно-белое изображение. В электронном виде фотографии представляются в стандартах растровой графики JPG, Tiff, BMP, PCX разрешением не менее 300 dpi;
- иллюстрации, графики, диаграммы, формулы и таблицы должны быть сохранены на электронном носителе каждый отдельным файлом, файл должен называться по названию аналогичного элемента в тексте;
- иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте. Нумерация формул приводится арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю страницы; порядковые номера

ссылок на использованные источники должны быть написаны внутри квадратных скобок;

- распечатка статьи должна полностью соответствовать приложенному файлу.

Рукописи, не соответствующие указанным требованиям, не принимаются.

8. Авторы статей несут ответственность за достоверность приводимых в статье данных и результатов исследований.

9. Редакция не взимает плату за опубликование научных статей.

10. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, осуществляющими послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

11. Поступившие в редакцию статьи после предварительной экспертизы на соответствие предъявляемым требованиям направляются на рецензию специалистам. Окончательное решение о публикации принимается на заседании редакционной коллегии с учетом результатов рецензирования.

12. Отклоненные редколлегией рукописи статей авторам не возвращаются. В случае возврата статьи автору на доработку датой представления считается день получения редакцией исправленной рукописи.

13. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения и сокращения в тексте статьи, реферате и abstract, не искажающие основное содержание статьи.

14. Статьи представляются в редакцию по адресу: 210035, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр., 72, Скробовой Алине Сергеевне. Электронный вариант материалов допускается направлять по электронной почте на адрес [vestnik-vstu@tut.by](mailto:vestnik-vstu@tut.by) ответственному секретарю редакционной коллегии Рыклину Дмитрию Борисовичу.



**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**ВЕСТНИК**

**ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ДВАДЦАТЬ СЕДЬМОЙ ВЫПУСК**

Оформление и вёрстка *Григорьева Н.В.*

Корректурa *Богачёва Е.М.*

Подписано в печать 23.12.2014. Печать ризографическая. Гарнитура PT Sans. Усл. печ. листов 13.8  
Уч.-изд. листов 24.8. Формат 60x90 1/8. Тираж 100 экз. Заказ № 8887.

Свёрстано и подготовлено к печати издательским  
отделом ЦИТ Витебского государственного  
технологического университета  
210035, Республика Беларусь, г. Витебск,  
Московский пр-т, 72.  
Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Отпечатано унитарным полиграфическим  
предприятием «Витебская областная типография»  
210015, Республика Беларусь, г. Витебск,  
ул. Щербакова-Набережная, 4.  
Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 2/19 от 26 ноября 2013 г.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь № 2554 от 31 мая 2005 г.