

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічных тэхналогій і аховы працы.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химических технологий и охраны труда.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry and labor protection.

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск *В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.*
Редактор *Р.Н. Авласенок.*

Подписано к печати 30.08.2017. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 21,02. Уч.-изд. л. 17,44. Тираж 100 экз. Заказ 1562.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ГРУПП МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Кинематическая структура металлорежущего станка рассматривается как объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное движение. Анализируются простые и сложные формообразующие группы, а также эволюция развития сложных формообразующих групп. Представлено станочное зацепление, воспроизводимое сложными формообразующими группами, имитирующими определенные механические передачи: винтовую червячную, зубчато-реечную и др. Рассмотрены сложные гибридные формообразующие группы мехатронных станочных систем, содержащие в структурной схеме типовые электронные интегральные схемы; системы синхронизации движения исполнительных органов сложных гибридных формообразующих групп. Показаны особенности настройки параметра «траектория сложных исполнительных движений», воспроизводимых гибридными формообразующими группами.

Ключевые слова: кинематическая структура металлорежущего станка, станочное зацепление, формообразующие группы, эволюция развития сложных формообразующих групп.

Введение. Современная научная парадигма [1], основанная на положениях теоретической механики (принципе возможных перемещений и законе разветвления энергии движения в кинематических цепях), рассматривает кинематическую структуру металлорежущего станка как объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное формообразующее или вспомогательное движение. Определяющую роль в формировании кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей многообразия формообразующих групп можно разделить на два вида: *первый вид* составляют простые, или элементарные, формообразующие группы, воспроизводящие простое вращательное или поступательное формообразующее движение. В таких группах траектория формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой; *второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное (реже трехэлементарное) формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например передачу винт-гайка, червячную передачу, зубчато-реечную передачу и т.д. В таких группах траектория формообразующего движения в станках с механическими связями настраивается соответствующим механизмом, например гитарой сменных зубчатых колес, передаточное отношение которой определяется с точностью до 5...7 знаков после запятой.

На рисунке 1 приведена классическая структурная схема винторезного станка, содержащего двухэлементарную формообразующую группу $\Phi_1(B_1P_2)$, воспроизводящую направляющую винтовую линию резьбы на заготовке 1, профиль (образующая) которой воспроизводится зеркальным отображением характеристического образа резца 2. В этом случае класс образования винтовой поверхности «копирование + след». По существу данная схема является частной винторезной структурой, входящей в общую структурную схему универсальных металлорежущих станков токарной группы.

Внутренняя связь рассматриваемой формообразующей группы – кинематическая цепь, состоящая из механических передач:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 4 \leftarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 6 \rightarrow TB \rightarrow 7 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 5.$$

Внутренняя связь создает потенциальную возможность винтового движения и обеспечивает качественную характеристику этого движения, т.е. его траекторию. Поэтому во внутренней связи расположен орган настройки на траекторию i_x , посредством которого устанавливают жесткую кинематическую связь между исполнительными органами шпинделем 3 и кареткой 7, и реверс R_1 , обеспечивающий возможность воспроизведения левой или правой винтовой линии резьбы. Внешняя связь обеспечивает количе-

ственную характеристику исполнительного движения, т.е. скорость воспроизведения направляющей, для чего во внешней связи установлен орган настройки на скорость i_v исполнительного движения и технологический реверс R_2 , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке. Вывод формул настройки для органов настройки i_x и i_v приведен в работе [1].

Таким образом, внутренняя связь сложной винторезной кинематической группы при функционировании имитирует передачу винт-гайка. Скорость этой имитации (темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности) зависит только от скорости звена 5 соединения связей, являющегося конечным звеном внешней связи. Это правило характерно для любой сложной формообразующей группы, имитирующей другую передачу, например, червячную, зубчатую, зубчато-реечную.

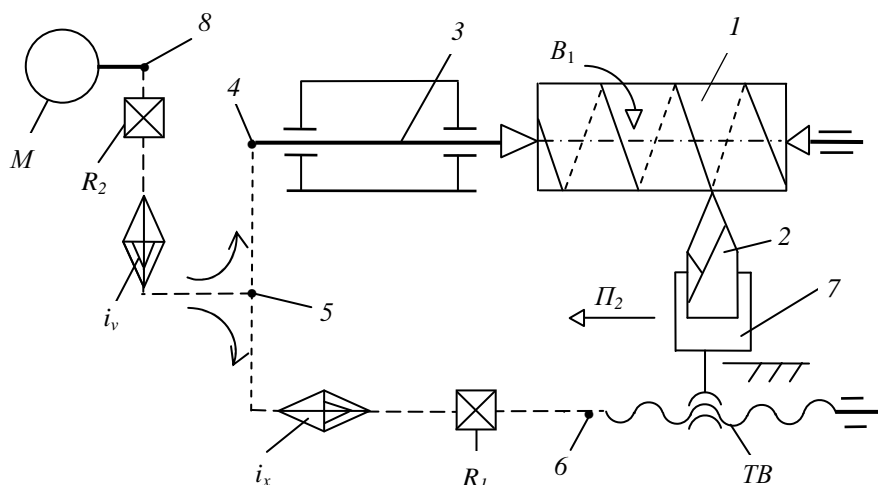


Рисунок 1. – Частная структурная схема станка с механическими связями для нарезания резьбы

Постановка задачи. Теория кинематической структуры металлорежущих станков разрабатывалась ее автором [2] на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Появление мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), и их интенсивное развитие привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура которых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. Поэтому считаем целесообразным с позиций современной парадигмы познания станочного оборудования рассмотреть эволюцию развития таких групп, имитирующих приведенные выше передачи.

Как показывает анализ патентных источников, в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, жесткая связь (синхронизация) исполнительных органов осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме «задающая – ведомая координаты» или по схеме равнозначных координат.

Отслеживающая синхронизация по схеме задающая – ведомая координаты. На рисунке 2 приведена мехатронная структурная схема винторезного станка, содержащего гибридную двухэлементарную формообразующую группу $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, воспроизводящую направляющую винтовую линию резьбы на заготовке 1. Профиль (образующая) резьбы, как и в схеме, представленной рисунком 1, воспроизводится зеркальным отображением характеристического образа резца 2. Класс образования винтовой поверхности – «копирование + след». Данная схема является частной винторезной структурой, входящей в общую структурную схему универсальных металлорежущих станков с ЧПУ. В токарных станках с ЧПУ оба исполнительных органа формообразующей группы $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ имеют отдельные электродвигатели, а жесткая функциональная связь элементарных движений B_1 и Π_2 осуществляется посредством электронной системы синхронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты. Задающей (ведущей) координатой является шпиндель 3 заготовки 1, ведомой – каретка 4, несущая инструмент 2. На различных этапах развития в качестве электродвигателя M_1 ведущей координаты, как правило, используется асинхронный электродвигатель. При этом на первых этапах в качестве органа настройки i_v использовалась типовая ступенчатая автоматическая коробка скоростей с электромагнитными муфтами. В современных станках рассматриваемого типа эта коробка заменена частотным преобразователем, обеспечивающим бесступенчатое регулирование круговой частоты электродвигателя M_1 . В качестве электродвигателя M_2 ведомой координаты последовательно использовались шаговый электродвигатель с гидросилителем крутящего момента, высокомоментный электродвигатель постоянного тока и синхронный электродвигатель.

Внутренняя связь гибридной формообразующей группы первых моделей токарных станков с ЧПУ – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow \text{синхронная следящая система} \rightarrow M_2 \rightarrow TB \rightarrow 4 \rightarrow \Pi_2.$$

Внешняя связь – механическая цепь:

$$M_1 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 5.$$

Синхронная следящая система содержит измерительный преобразователь 6, кинематически связанный посредством звена соединения связей 5 со шпинделем 3. Выход этого преобразователя соединен с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 7 и блока задания коэффициента деления 8. Выход счетчика 7 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 9. Выход этого преобразователя через предварительный усилитель 10 и усилитель мощности 11 соединен с электродвигателем M_2 , кинематически связанным с тяговым валом TB привода поступательного движения каретки 4.

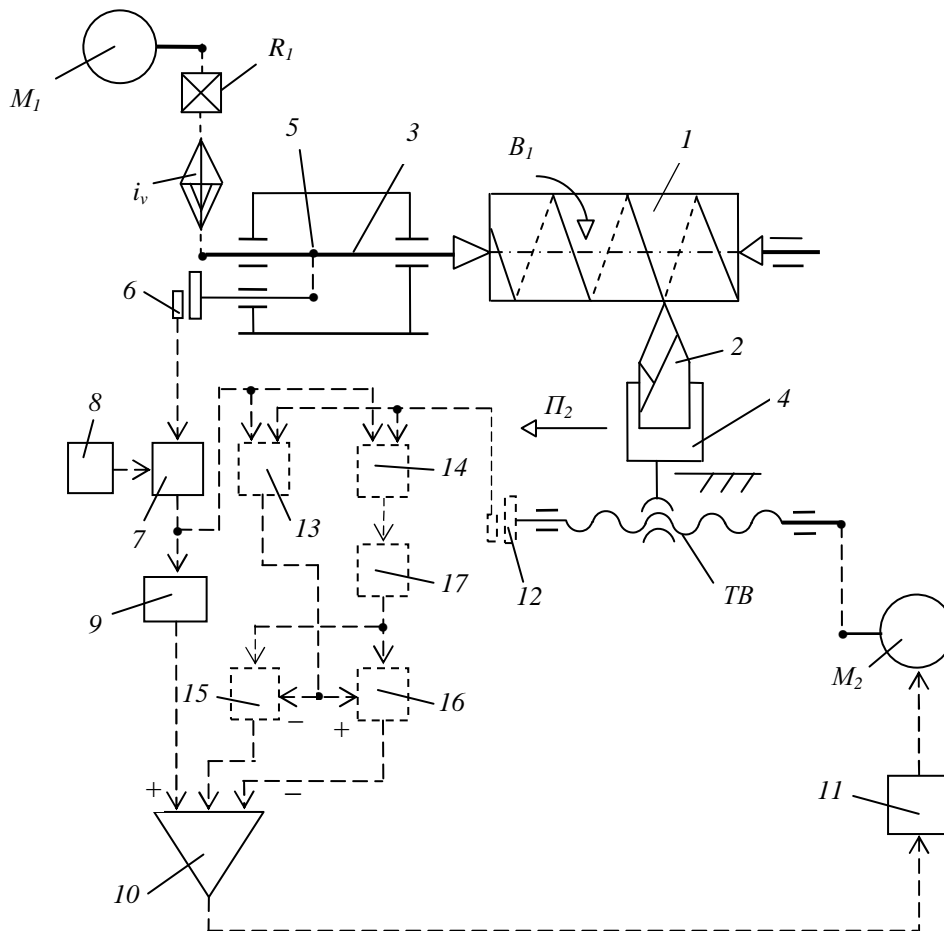


Рисунок 2. – Мехатронная структура резьбонарезного станка с электронной системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты

Принципиальной особенностью рассматриваемой схемы системы синхронизации является размещение электродвигателя ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. При этом измерительный преобразователь 6 выполняет функцию задатчика управляющего сигнала для электродвигателя M_2 ведомой координаты – каретки 4. Делитель частоты (счетчик 7 – блок установки коэффициента деления 8) является аналогом органа настройки i_x на траекторию (винтовую линию) в структурной схеме, представленной на рисунке 1. Поэтому коэффициент деления определяется по формуле, аналогичной формуле для определения передаточного отношения органа настройки i_x :

$$k_x = P / (i_0 P_{TB}),$$

где k_x – коэффициент деления; P – шаг винтовой линии нарезаемой резьбы; i_0 – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель M_2 с тяговым валом TB ; P_{TB} – шаг тягового вала.

При включении электродвигателя M_1 ведущая координата – шпиндель 3 – получает движение V_1 с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в измерительном преобразователе 6 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения V_1 . Этот сигнал поступает в счетчик 7 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 8 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 9 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода поступает на предварительный усилитель 10. С выхода этого усилителя задающий сигнал через усилитель мощности 11 поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который посредством тягового вала TB сообщает движение P_2 ведомой координате – каретке 4, несущей резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой поверхности (резьбы) сложным двухэлементарным движением $\Phi_v(B_1P_2)$.

При использовании рассмотренной структурной схемы девиация механики ведомой координаты проецируются на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели получаемой резьбы, можно устранить посредством модификации схемы синхронизации, обеспечивающей непрерывную коррекцию задающего сигнала ведомой координаты. Для решения данной задачи на тяговом валу устанавливается измерительный преобразователь 12, а предварительный усилитель 10 заменяется параллельным сумматором, у которого первый вход сложения соединяется с выходом импульсно-аналогового преобразователя 9, а выход – с усилителем мощности 11 [3]. В схему синхронизации вводятся знаковый 13 и фазовый 14 дискриминаторы, ключ 15, управляемый отрицательным потенциалом, ключ 16, управляемый положительным потенциалом, и импульсно-аналоговый преобразователь 17. Первые входы дискриминаторов 13 и 14 соединяют с выходом импульсно-аналогового преобразователя 9, а вторые входы этих дискриминаторов соединяют с выходом измерительного преобразователя 12. Выход знакового дискриминатора 13 соединяют с управляющим входом ключа 15, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 16, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 14 соединяют с входом импульсно-аналогового преобразователя 17, а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 15 и 16. Выходы ключей 15 и 16 соединяют соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 10.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 10, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 13 и фазового 14 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 7 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя 12 поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения P_2 каретки 4. В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 15 и 16. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 14 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 17 поступает на аналоговые входы ключей 15 и 16. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 10 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 15, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 10, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 16, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 10 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, т.е. происходит его непрерывная двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

Система синхронизации по схеме равнозначных координат. В рассмотренной сложной гибридной формообразующей группе с системой синхронизации исполнительных органов по схеме задающая – ведомая координата (каретка 4) режущего инструмента 2 – «отслеживает» движение ведущей координаты – шпинделя 3 заготовки 1, а следовательно «отслеживает» девиацию механики этой координаты. Этот недостаток устраняется при использовании более сложной системы синхронизации [4], выполненной по схеме равнозначных координат. На рисунке 3 приведена соответствующая структурная схема винторезного станка, содержащего гибридную двухэлементарную формообразующую группу $\Phi_v(B_1P_2)$, которая выполняет такую же функцию, что и подобная группа в схеме по рисунку 2, т.е. воспроизведение направляющей винтовой линии резьбы на заготовке 1 резцом 2.

Внутренняя связь сложной гибридной группы $\Phi_v(B_1P_2)$ в этом техническом решении:

$V_1 \rightarrow$ шпиндель 3 $\rightarrow M_1 \rightarrow$ система синхронизации приводов $\rightarrow M_2 \rightarrow TB \rightarrow$ каретка 4 $\rightarrow P_2$.

Внешняя связь:

импульсный эталонный генератор 5 \rightarrow шина 6 связи с системой синхронизации.

На обеих координатах (исполнительных органах станка) установлены импульсные измерительные преобразователи 7 и 8. Привод исполнительных органов осуществляется управляемыми, например, синхронными электродвигателями.

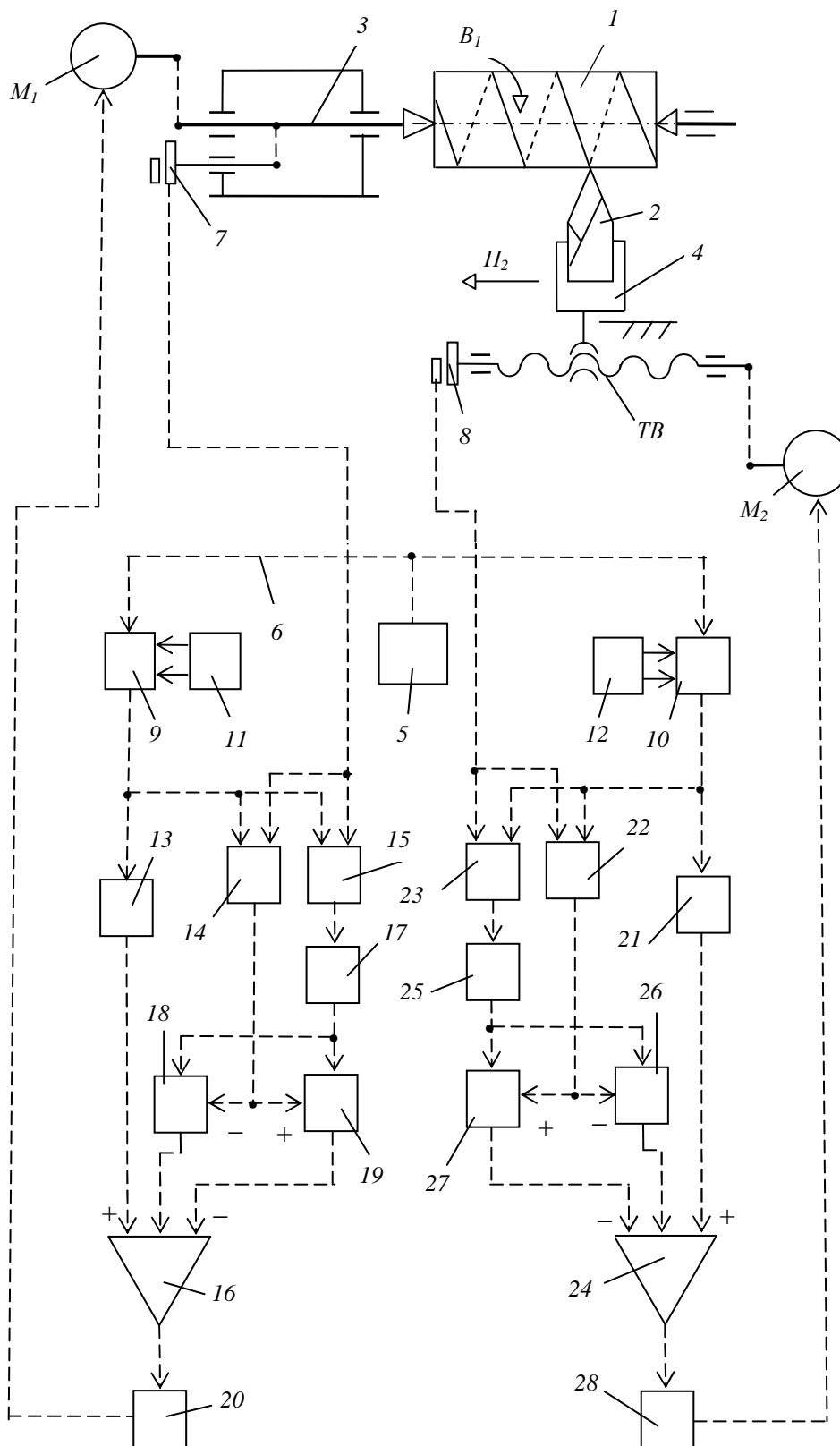


Рисунок 3. – Структура резонансного станка с системой синхронизации исполнительных органов по схеме равнозначных координат

Высокочастотный импульсный эталонный генератор 5 является общим задатчиком для электродвигателей M_1 и M_2 . Его выход соединен с входами счетчиков 9 и 10, образующими делители частоты

совместно с блоками соответственно 11 и 12 установки коэффициентов деления. Выход счетчика 9 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 13 и с первыми входами знакового 14 и фазового 15 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 7. Выход импульсно-аналогового преобразователя 13 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 16. Выход фазового дискриминатора 15 через импульсно-аналоговый преобразователь 17 соединен с аналоговым входом ключа 18, управляемого отрицательным потенциалом, и с аналоговым входом ключа 19, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 18 и 19 соединены с выходом знакового дискриминатора 14. Выход ключа 18 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 16, а выход ключа 19 – с входом вычитания этого сумматора. Выход параллельного сумматора 16 соединен через усилитель мощности 20 с управляемым электродвигателем M_1 шпинделя 3 заготовки.

Выход счетчика 10 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 21 и с первыми входами знакового 22 и фазового 23 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 8. Выход импульсно-аналогового преобразователя 21 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 24. Выход фазового дискриминатора 23 через импульсно-аналоговый преобразователь 25 соединен с аналоговым входом ключа 26, управляемого отрицательным потенциалом, и с аналоговым входом ключа 27, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 26 и 27 соединены с выходом знакового дискриминатора 22. Выход ключа 26 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 24, а выход ключа 27 – с входом вычитания этого сумматора. Выход параллельного сумматора 24 соединен через усилитель мощности 28 с управляемым электродвигателем M_2 каретки 4 режущего инструмента.

Нормируемым технологическим параметром при нарезании резьбы является скорость резания. При настройке станка по общеизвестной зависимости, связывающей скорость резания, диаметр заготовки и ее круговую частоту при обработке, определяют круговую частоту шпинделя 3 (параметр настройки скорости). Посредством блока 11 устанавливают коэффициент деления k_v , при котором на выходе счетчика 9 при функционировании схемы синхронизации образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте шпинделя 3.

Для вывода коэффициента деления, устанавливаемого на делителе частоты (счетчик 10 – блок 12 установки коэффициента деления), воспользуемся известными расчетными перемещениями:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (П_2),$$

где P – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ) для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью, имеет вид:

$$P = 1 \cdot i_{01} (n_{M1} / n_{M2}) P_{ТВ},$$

где i_{01} – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Круговые частоты электродвигателей M_1 и M_2 однозначно зависят от задающих сигналов на выходе счетчиков 9 и 10 соответственно. Поэтому в УКЦ круговые частоты электродвигателей можно заменить коэффициентами деления. Тогда

$$P = 1 \cdot i_{01} (k_v / k_x) P_{ТВ}.$$

Из полученного выражения выводится формула настройки параметра «траектория»:

$$k_x = c \cdot k_v / P,$$

где $c \cdot P_{ТВ}$ – константа механики конкретного станка.

Функционирование станка с описанной системой синхронизации исполнительных органов осуществляется следующим образом. Генератор 5 вырабатывает эталонный высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на счетчики 9 и 10 делителей частоты, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках 11 и 12. Сигнал с выхода счетчика 9 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 16 – и усилитель мощности 20 поступает на управляемый электродвигатель M_1 , сообщающий шпинделю 3, несущему заготовку, движение B_1 . Синхронно импульсный сигнал с выхода счетчика 10 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 21 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе, и через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 24 и усилитель мощности 28 поступает на управляемый электродвигателя M_2 , который сообщает движение $П_2$ каретке 5, несущей инструмент. В итоге такого прохождения задающего сигнала от общего задатчика (генератора 5) к обоим координа-

там (исполнительным органам винторезной группы) осуществляется воспроизведение винтовой линии сложным формообразующим движением $\Phi_v(B_1P_2)$.

Одновременно посредством дополнительных блоков устраняется девиация механических систем обоих исполнительных органов посредством коррекции управляющих сигналов на выходах параллельных сумматоров. На первых входах знакового 14 и фазового 15 дискриминаторов постоянно действует эталонный импульсный сигнал с выхода счетчика 9. На вторые входы этих дискриминаторов поступает сигнал с импульсного измерительного преобразователя 7, соответствующий значению действительной круговой подачи шпинделя 3. В дискриминаторах оба сигнала непрерывно сравниваются. В результате на выходе знакового дискриминатора 14 появляется отрицательный или положительный потенциал соответственно при отставании или при опережении шпинделем номинального значения круговой частоты. Этот сигнал поступает на управляющие входы ключей 18 и 19. Параллельно на аналоговые входы этих ключей поступает сигнал абсолютной погрешности с фазового дискриминатора 15 через импульсно-аналоговый преобразователь 17. Сигнал абсолютной погрешности поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 16 через ключ 18 при отставании шпинделя или на вход вычитания этого сумматора через ключ 19 при опережении шпинделем номинального значения. В итоге в параллельном сумматоре происходит коррекция задающего сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит предельная двухсторонняя адаптация задающего сигнала по параметру девиации механики исполнительного органа – шпинделя 3.

Аналогично в знаковом 22 и фазовом 23 дискриминаторах сравнивается эталонный задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 10 с сигналом – аналогом действительной скорости каретки 4, поступающим с импульсного измерительного преобразователя 8. Сигнал абсолютной погрешности преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 25 и поступает через ключи 26 или 27 в параллельный сумматор 24 для коррекции задающего сигнала, действующего на его первом входе сложения. В итоге осуществляется предельная двухсторонняя адаптация задающего сигнала по параметру девиации механики исполнительного органа – каретки 4.

Заключение. С позиций современной парадигмы познания станочного оборудования рассмотрены две базовые схемы сложных гибридных формообразующих групп, содержащих в структурных схемах электронную систему синхронизации на базе типовых интегральных схем. Различные модификации этих групп используются в металлорежущих станках с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 2–11.
2. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – Изд. второе. – М. : Машиностроение, 1970.
3. Зубодолбежный станок с ЧПУ : а. с. SU 1366360 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1988.
4. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка : пат. BY 8621 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 30.10. 2006.

Поступила 07.08.2017

THE EVOLUTION OF THE COMPLEX FORMING GROUPS OF METAL-CUTTING MACHINES

A. GOLEMBIEWSKI

Kinematic structure of machine tools is considered as a unification of kinematic groups, each of which plays a definite movement. The simple and complex forming groups, and the evolution of complex forming groups are analysed. Machine tool gearing, reproducible complex forming groups that mimic certain power transmission: worm screw, rack and pinion etc. is represented. A complex hybrid of forming groups of mechatronic machine-tool systems containing the block diagram of typical electronic integrated circuits; the system of synchronization of movement of Executive bodies of complex hybrid forming groups are considered. The features of the setting, "the trajectory of complex Executive movements" reproduced forming hybrid groups are shown.

Keywords: kinematic structure in machine tools, machine coupling, forming the group, the evolution of the complex forming groups.

УДК 621.91.04

СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ КРУГОВОГО ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. **Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**; **А.А. ДАНИЛОВ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены известные методы формообразования некруглых моментопередающих поверхностей при обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело. На основе их анализа и алгоритма синтеза кинематических схем обработки обоснована схема кругового точения профильных деталей с рациональным распределением исполнительных движений формообразования и деления между инструментом и заготовкой. Показано, что при сообщении главного движения инструменту, а движения деления заготовке и применении многолезвийного инструмента охватывающего типа обеспечивается по сравнению с известной схемой кругового точения повышение непрерывности процесса резания и производительности обработки. Разработаны варианты реализации предложенной схемы профилирования некруглых поверхностей на универсальном фрезерном станке при обработке коротких деталей и на специализированном станке для кругового точения длинных деталей. Спроектирована кинематическая структура станка для обработки деталей типа валов с профилем в виде многоугольника Рело.

Ключевые слова: многоугольники Рело, формообразование, круговое точение, схемы обработки, станки и инструменты.

Введение. В трансмиссиях различных машин и механизмов, приборах, инструментальных системах металлорежущих станков и другой технике наряду с традиционными шпоночными и шлицевыми соединениями применяются профильные соединения, в которых передача крутящего момента обеспечивается за счет соответствующей формы рабочих поверхностей сопряженных деталей. Профильные соединения по сравнению со шлицевыми имеют меньшую себестоимость при более высокой усталостной прочности, долговечности и других эксплуатационных преимуществах [1], что обуславливает актуальность их применения в технике. Профиль моментопередающей поверхности может быть ограничен непрерывной замкнутой контурной кривой или множеством пересекающихся линий (прямых, окружностей и др.), образующих многоугольник с прямолинейными или криволинейными сторонами. Контурные кривые могут быть равноосными, синусоидальными, циклоидальными и др. В машиностроении чаще применяется трехгранный профиль с равноосным контуром в виде линий равной ширины (РК-3 профиль), параметры которого регламентируются соответствующими стандартами [2; 3]. Технологическим преимуществом равноосного контура по сравнению с близкими к нему синусоидальным и циклоидальным контуром является неизменность расстояния между двумя любыми параллельными касательными к нему, что позволяет использовать при изготовлении деталей профильного соединения универсальные средства контроля.

Однако из-за сложной геометрии РК-профиля требуется дорогостоящее специальное станочное оборудование для обработки деталей профильного соединения. Поэтому практическое значение имеет применение более технологичных профильных соединений, в частности основанных на применении многоугольников Рело, также обладающих свойством равноосности.

Многоугольники Рело – это фигуры равной ширины с нечетным числом сторон в виде дуг окружности определенного радиуса. Шириной многоугольника Рело называется расстояние между любыми двумя параллельными касательными к контурной кривой, ограничивающей данную фигуру. Основными параметрами многоугольника Рело являются: число сторон (3, 5 и т.д.); ширина b ; радиусы описанной R_0 и вписанной r окружностей (рисунок 1). Треугольник Рело – простейшая после круга фигура равной ширины, строящаяся на базе равностороннего треугольника ABC (см. рисунок 1), соседние вершины которого соединены между собой дугой окружности с радиусом, равным ширине b треугольника Рело. Через ширину b выражаются другие параметры треугольника Рело.

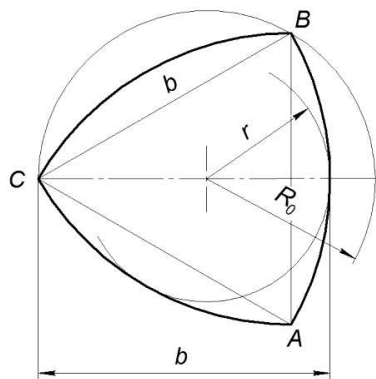


Рисунок 1. – Геометрические параметры треугольника Рело

На базе многоугольников Рело могут быть основаны профильные моментопередающие соединения типа вал-втулка, для обработки которых требуется разработка соответствующих методов и средств их реализации. Эта задача рассматривается нами применительно к обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело на основе представленной на рисунке 2 последовательности синтеза схем обработки.

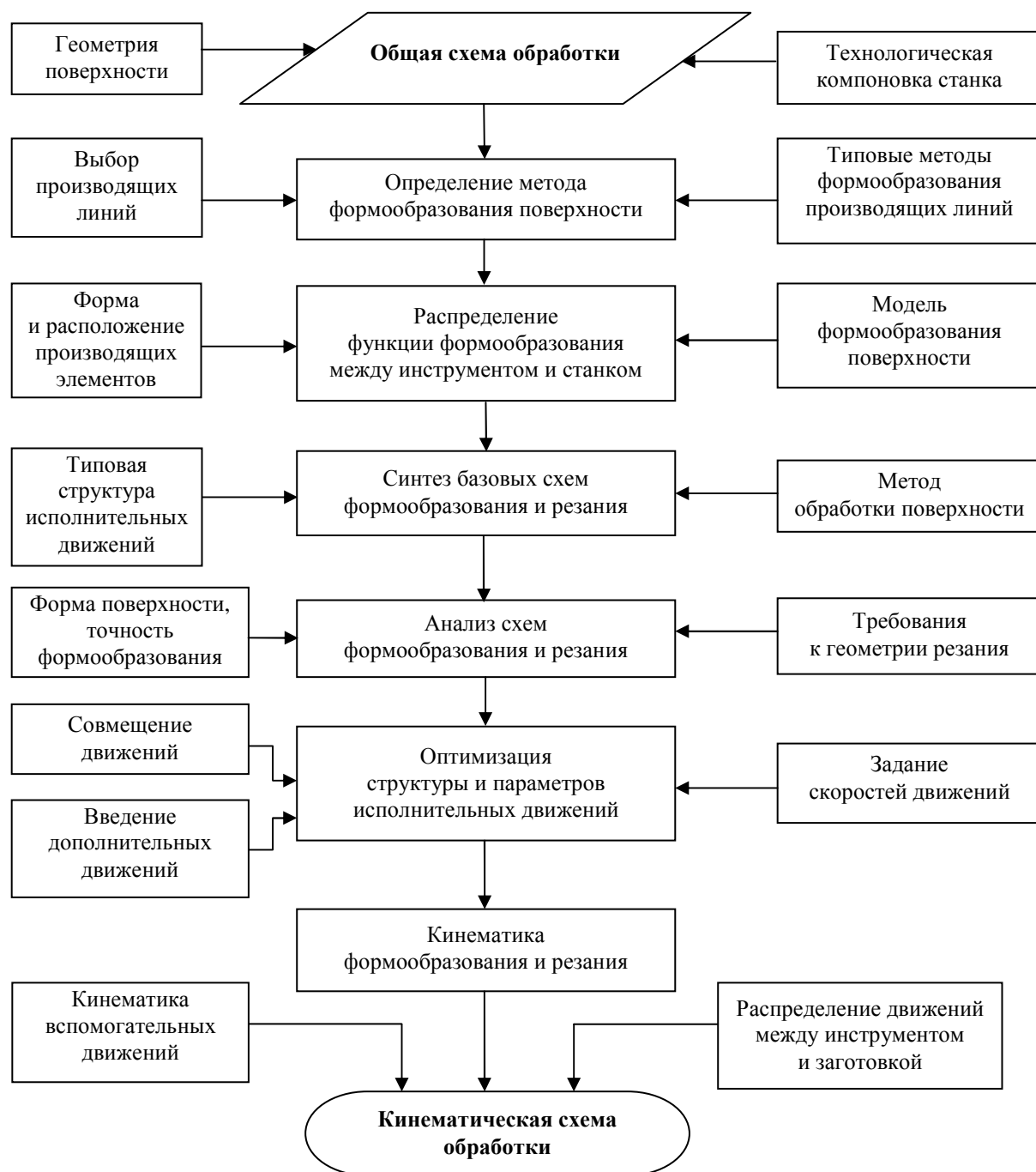


Рисунок 2. – Последовательность синтеза кинематической схемы обработки

Схемы формообразования треугольника Рело. Формирование треугольника Рело возможно методами, применяемыми при формообразовании других профилей [4]: копирования (обработка фасонными фрезами [5]); обката (обработка червячными фрезами [6] и долбяками [7]); касания (обработка концевыми [8] и специальными дисковыми [9] фрезами); следа (некруглое [10], полигональное [11; 12] и круговое [13] точение). Следует отметить, что известные исследования по обработке профильных моментопередающих поверхностей посвящены преимущественно формообразованию РК-профиля, циклоидального и синусоидального профилей. В работе [14] исследован процесс обработки внутренних поверхностей деталей с профилем в виде эквидистанты треугольника Рело.

Для решения рассматриваемой задачи требуется разработать новую или выбрать из известных рациональную схему формирования профиля в виде треугольника Рело, удовлетворяющую требованиям производительности и точности формообразования, простоте реализации. Выполнение этих требований достигается, как показано на рисунке 2, за счет следующих факторов: задание рациональной геометрии

производящих линий номинальной поверхности детали; методы их формообразования; распределение функции формообразования и исполнительных движений между режущим инструментом и кинематикой станка; выбор или разработка метода обработки и конструкции инструмента; оптимизация структуры и параметров исполнительных движений и других факторов с учетом требований к точности формообразования и геометрии резания (стабильности рабочих углов режущей части). На основе такого подхода проанализированы указанные выше методы формообразования применительно к обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело.

Реализация методов копирования и обката требует применения специального фасонного режущего инструмента для каждого типоразмера обрабатываемых деталей, что экономически целесообразно лишь при определенных масштабах производства. Недостатком метода копирования при обработке фасонными инструментами является невозможность оптимизации скорости резания, так как она зависит от радиуса инструмента. Формирование профиля детали методом касания возможно на фрезерных и шлифовальных станках с копировальной или числовой системами управления. Обработка концевыми фрезами на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ применяется для коротких деталей [8]. Заслуживает внимания метод следа, реализуемый простым режущим инструментом (резцом или резцовой головкой). Профилирование методом следа дуги окружности, центр которой не расположен на оси вращательного движения формообразования, возможно некруглым [10] и полигональным [12] точением, а при совмещении указанных центра и оси – круговым точением [13]. Для выбора рационального из них рассмотрим эти методы применительно к формированию треугольника Рело.

Некруговое точение. Профилирование некруглой поверхности методом следа, реализуемого некруглым точением, основано на сообщении заготовке 1 (рисунок 3, а) вращательного движения B_1 вокруг ее оси L , а резцу – возвратно-поступательного движения O_2 в плоскости вращения заготовки. При этом отношение частот возвратно-поступательного движения резца и вращения заготовки равно числу конгруэнтных участков сторон профиля.

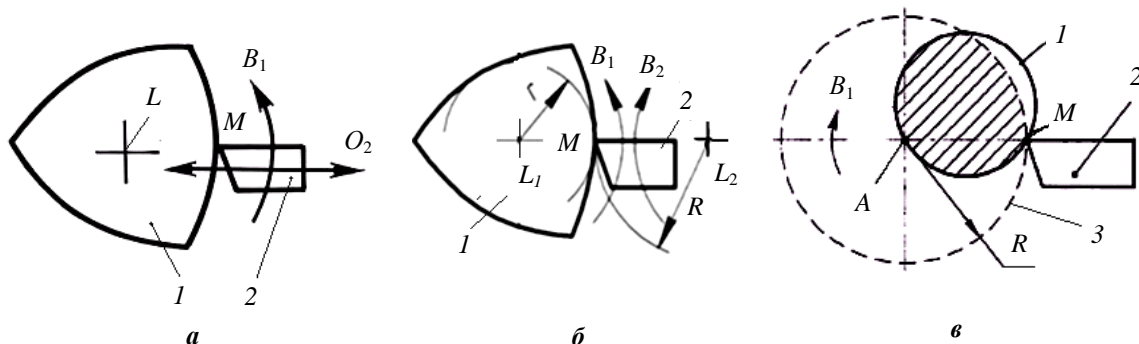


Рисунок 3. – Схемы профилирования детали некруглым (а), полигональным (б) и круговым (в) точением

Указанные элементарные движения образуют сложное движение профилирования $\Phi(B_1O_2)$, совершаемое производящей точкой M инструмента. Метод некруглого точения реализуется на специальных станках для профильного точения и модернизированных универсальных, например, токарно-затыловочных [1]. Его недостатком является низкая производительность из-за возвратно-поступательного движения исполнительного органа станка с резцом, вызывающего значительные знакопеременные нагрузки в механизмах станка, поэтому частота вращения заготовки не превышает 100 мин^{-1} . Следует отметить также отрицательное влияние на точность профилирования формирование окружности сложным исполнительным движением $\Phi(B_1O_2)$, которая ниже, чем при ее получении простым движением $\Phi(B_1)$.

Существенный недостаток некруглого точения, ограничивающий область его применения при обработке профильных деталей резанием, заключается в непрерывном изменении рабочих углов режущей части резца в зависимости от кривизны формируемой линии, что не позволяет оптимизировать условия резания. В этой связи необходимо оценить возможность применения некруглого точения для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело. Так как угол при вершине треугольника Рело равен 120° , то при ее прохождении передний и задний углы режущей части резца скачкообразно изменяются в диапазоне $\pm 60^\circ$, что исключает возможность обработки деталей с таким профилем некруглым точением. По рассмотренной схеме возможна обработка некруглых поверхностей в виде треугольника Рело поверхностно-пластическим деформированием, например, выглаживанием, а также методами физико-технической обработки.

Полигональное точение. При полигональном точении формируемая линия образуется как траектория производящей точки M , совершающей одновременно одинаково направленные вращательные

движения B_1 и B_2 (рисунок 3, б). Одно из этих движений сообщается заготовке 1, а другое – режущему инструменту 2. При равных угловых скоростях вращательных движений указанная траектория представляет собой окружность [12], что при определенном значении радиуса R инструмента теоретически позволяет формировать сторону треугольника Рело. При оснащении инструмента тремя режущими элементами, равномерно расположенными по окружности радиусом R , формируются три пересекающиеся окружности, образующие треугольник Рело. В этом случае функция деления выполняется за счет конструкции инструмента, что упрощает схему обработки и конструкцию станка. Погрешность формирования окружности полигональным точением зависит от точности согласования двух вращательных движений и каждого из них, поэтому будет ниже, чем при обычном точении. Кроме того, как показало исследование, схема полигонального формирования треугольника Рело методом следа не может быть реализована при обработке резанием из-за недопустимого изменения рабочих углов режущей части инструмента. Она может быть использована для обработки профильных деталей поверхностно-пластическим деформированием.

Круговое точение. Выполнение стороны треугольника Рело в виде дуги окружности позволяет формировать ее методом кругового точения, т.е. одним вращательным движением, при условии, что оно осуществляется вокруг оси, проходящей через вершину треугольника Рело перпендикулярно плоскости вращения, расположенную напротив обрабатываемой его стороны. На этом основан известный способ обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело [13] (рисунок 3, в), согласно которому заготовке 1 сообщают вращательное движение B_1 вокруг оси, проходящей через вершину A треугольника Рело.

Обработка производится резцом 2, его вершина (производящая точка M) в относительном движении описывает окружность 3, радиус R которой равен ширине b (см. рисунок 1) треугольника Рело. Для формирования обработанной поверхности по длине резцу сообщается также движение подачи вдоль оси вращения заготовки. После обработки каждой грани детали заготовку переустанавливают так, чтобы ось ее вращения проходила через другую вершину треугольника Рело, и обрабатывают следующую грань детали.

Достоинства метода кругового точения – более высокая точность формирования окружности по сравнению с методами некругового и полигонального точения, так как она зависит только от точности кинематической пары вращения, а также стабильность рабочих углов резца.

Недостатком рассматриваемой схемы обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело является низкая производительность вследствие следующих причин:

- резец контактирует с заготовкой за время ее одного оборота вокруг оси вращения на небольшом угле, что обуславливает значительную прерывистость процесса обработки и многократное превышение времени холостого перемещения заготовки по окружности по сравнению с временем резания;
- эксцентричная установка заготовки относительно оси вращения влечет значительную неуравновешенность и ограничивает частоту ее вращения, а следовательно и скорость резания, и производительность обработки;
- нерациональная схема срезания припуска, которая характеризуется непрерывным возрастанием дисбаланса заготовки в процессе обработки по мере перемещения инструмента вдоль заготовки и срезания с нее слоя металла;
- для закрепления длинных заготовок требуется оснащение станка специальным приспособлением, что связано с увеличением вспомогательного времени и снижением производительности, а также существенно усложняет реализацию схемы обработки.

Отмеченные недостатки обусловлены нерациональным распределением движений между инструментом и заготовкой – сообщением заготовке вращения, необходимого для формирования окружности.

Интенсификация процесса обработки достигается при ином распределении исполнительных движений между инструментом и заготовкой, в частности при сообщении главного движения $\Phi_v(B_1)$ инструменту. На этом основан способ обработки деталей с профилем равной ширины резцовой головкой, по которому режущему инструменту сообщается главное движение $\Phi_v(B_1)$, проиллюстрированное рисунком 4. При этом движение подачи $\Phi_s(P_2)$ может сообщаться как резцовой головке, так и заготовке.

Многогранную поверхность с профилем в виде треугольника Рело обрабатывают на заготовке 1 инструментом в виде охватывающей резцовой головки 2 с несколькими режущими элементами 3, например, сменными режущими пластинками, которые устанавливают по окружности, радиус R которой равен ширине b треугольника Рело. Количество резцов в головке не зависит от числа обрабатываемых граней и может быть различным (например, резцовая головка 2 на рисунке 4, а имеет 3 резца, а на рисунке 4, б – 12 резцов). С увеличением количества резцов пропорционально уменьшается машинное время обработки. Максимальное количество резцов в головке определяется конструктивными факторами.

После обработки одной грани заготовке 1 сообщается поворот B_3 (движение деления $D(B_3)$) вокруг ее оси 7 на угол, равный углу между соседними гранями детали. Затем, как описано выше, обрабатывают вторую грань и так далее, до окончания обработки всех граней детали.

Вследствие того, что вращательное движение со скоростью резания сообщается не заготовке, а режущему инструменту, исключены инерционные нагрузки, обусловленные эксцентричным располо-

жением (неуравновешенностью) заготовки относительно оси ее вращения, что позволяет повысить скорость резания и, соответственно, производительность обработки. Кроме того, при обработке многолезцовой головкой многократно уменьшается время холостых ходов, в течение которых процесс резания не выполняется, благодаря чему возрастает доля машинного времени в цикле обработки и, соответственно, повышается производительность обработки.

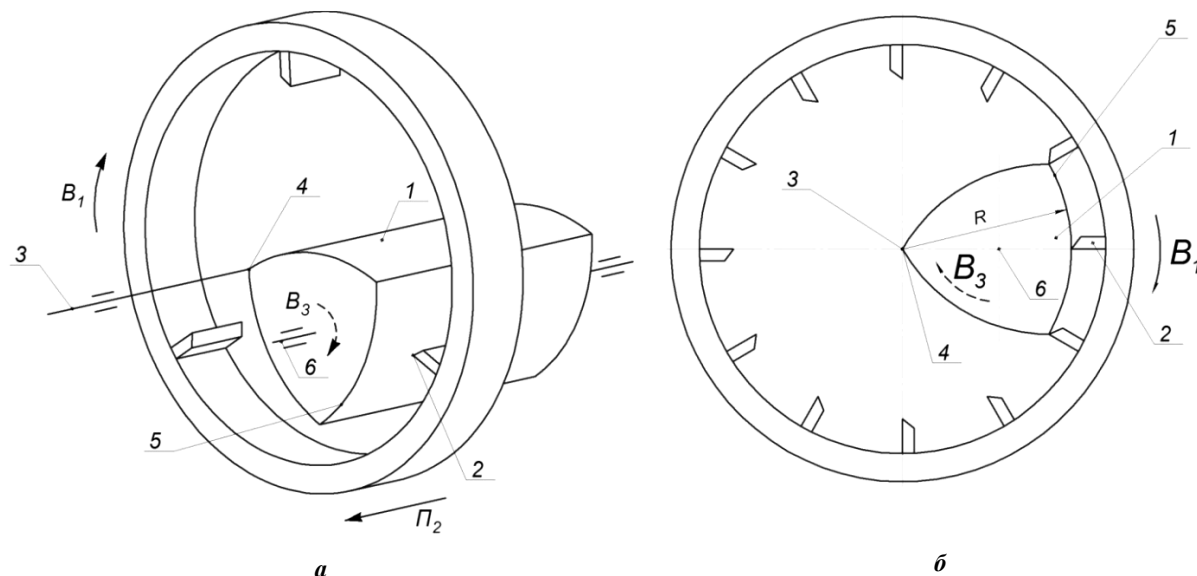


Рисунок 4. – Кинематическая схема обработки (а) и схема формирования профиля детали в виде треугольника Рело (б) охватываемой резцовой головкой

Наиболее значимо для повышения производительности обработки многогранных деталей применение режущего инструмента в виде охватываемой многолезцовой головки, благодаря чему машинное время обработки грани детали уменьшается по сравнению с известным способом [13] в количество раз, равное числу резцов головки.

Реализация кинематических схем механической обработки поверхностей деталей машин связана с созданием станочного оборудования и его инструментального оснащения. Первостепенное значение в создании станочного оборудования имеет этап функционального (концептуального и схемотехнического) проектирования [15], поскольку допущенные здесь ошибки не могут быть устранены на последующих этапах проектирования и конструирования. Важной задачей на этом этапе является синтез кинематической структуры станка.

Синтез кинематической структуры станка для обработки валов с профилем в виде треугольника Рело. Синтез кинематической структуры – важный этап схемотехнического проектирования станка, так как она является основой его кинематической схемы и компоновки, реализует функциональные связи в формообразующей системе. Рассмотрим эту задачу для реализации представленной выше схемы обработки валов с профилем в виде треугольника Рело. Задача решается на основе общих принципов анализа и синтеза кинематической структуры станков [16], к которым относятся следующие:

- любое исполнительное движение создается соответствующей кинематической группой;
- кинематическая группа содержит источник движения, внешнюю и внутреннюю связи с размещенными в них органами настройки параметров исполнительного движения;
- совокупность кинематических групп и межгрупповых связей образуют кинематическую структуру станка.

Таким образом, первым этапом разработки кинематической структуры станка является синтез кинематических групп исполнительных движений исходя из формы производящих линий поверхности, кинематики их формообразования и реализуемых функциональных связей.

Как показано выше, для формирования треугольника Рело по схеме кругового точения необходимы вращательное движение инструмента со скоростью резания и периодический поворот заготовки для обработки каждой следующей грани, т.е. движение деления. Для обработки детали по длине требуется простое движение подачи $\Phi_s(P_2)$. Кроме указанных движений формообразования на станке необходимы:

- перемещение инструмента в радиальном направлении – установочное движение и вспомогательное движение – его перемещение в обратном направлении в исходное положение;
- вспомогательное перемещение инструмента вдоль оси заготовки.

Исходя из схем формообразования и резания кинематическая структура станка для обработки конической детали с профилем в виде треугольника Рело (рисунок 5) содержит кинематические группы указанных исполнительных движений.

Заготовку 1 обрабатывают охватывающей резцовой головкой 2, снабженной резцами 3, которой двигателем M_1 сообщают вращение B_1 со скоростью резания вокруг оси 4, проходящей через вершину треугольника Рело, расположенную противоположно его обрабатываемой стороне. Поэтому образующей обработанной поверхности является дуга окружности.

Резцовая головка смонтирована на поперечном суппорте 5 станка, перемещение Π_3 которого в радиальном направлении осуществляется посредством двигателя M_3 и тягового устройства 6. Поперечный суппорт установлен на продольном суппорте 8, который имеет возможность продольного перемещения Π_2 по станине 9 с помощью двигателя M_2 и тягового устройства 10 для формирования детали по длине. В результате движений $\Phi_v(B_1)$ и $\Phi_s(\Pi_2)$ на заготовке 1 обрабатывается одна грань детали.

Для обработки следующей грани шпинделю 11 с заготовкой 1 от привода 12 с делительным устройством сообщается вокруг оси заготовки 7 поворот на угол, равный 120° (движение деления $D(B_4)$), и далее описанным выше способом обрабатывается следующая грань детали.

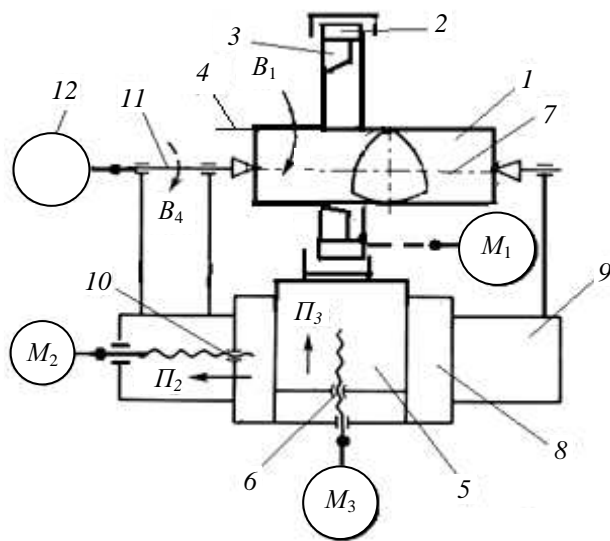


Рисунок 5. – Структурная схема станка для обработки круговым точением деталей с профилем в виде треугольника Рело

Предложенная схема кругового точения поверхностей с профилем в виде многоугольника Рело применительно к обработке коротких деталей может быть реализована также на горизонтально-фрезерном станке. В этом случае резцовая головка крепится на шпинделе станка, а заготовка – в универсальной делительной головке, установленной на его продольном столе. Движение подачи для формирования детали по длине осуществляется перемещением поперечного суппорта.

Заключение. Формирование производящей линии номинальной поверхности детали в виде многоугольника Рело возможно методами копирования, обката, касания и следа, из которых (как более простой в реализации) предпочтителен метод следа. Этот метод формообразования многоугольников Рело может быть осуществлен технологическими методами некруглого, полигонального и кругового точения, однако предпочтителен метод кругового точения, обеспечивающий постоянство рабочих углов режущей части инструмента. Из возможных схем кругового точения деталей с профилем в виде треугольника Рело рациональной является схема, основанная на сообщении вращательного движения резцовой головке охватывающего типа, обеспечивающая по сравнению со схемой с вращательным движением заготовки более благоприятные динамические условия работы станка и повышение производительности за счет увеличения доли машинного времени в цикле обработки и применения многолезвийного режущего инструмента. Разработана структурная схема специализированного станка, реализующего рациональную схему кругового точения деталей типа валов с профилем в виде многоугольника Рело.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / А.И. Тимченко – М., 1993. – 41 с.

2. Antriebselemente Polygonprofile P3G : DIN 32711-79. – Berlin : Beuth. – 3 S.
3. Соединения профильные. Типы и размеры : ОСТ 92-4742-86.
4. Пантелеенко, Ф.И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф.И. Пантелеенко, А.А. Данилов // Актуальные проблемы в машиностроении. Т. 4, № 1. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – С. 59–64.
5. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Шитиков. – Тула, 2007. – 20 с.
6. Волковский, С.В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента, реализующего метод огибания : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С.В. Волковский. – Хабаровск, 2002. – 218 л.
7. Панкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / П.А. Панкратов. – Курск, 2013. – 20 с.
8. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н.В. Зенин. – М., 2007. – 132 с.
9. Максименко, Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Максименко. – Курск, 2014. – 20 с.
10. Ворона, В.В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В.В. Ворона. – Курск, 2008. – 202 с.
11. Разумов, М.С. Повышение производительности формообразования наружных поверхностей посредством планетарного механизма : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / М.С. Разумов. – Курск, 2011 – 158 с.
12. Данилов, А.А. Анализ и реализация схем полигонального течения многогранных поверхностей / А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 19–27.
13. Способ обработки профильного вала равной ширины : пат. RU 2463129 / А.И. Барботько, П.А. Панкратов, М.С. Разумов. – Опубл. 10.10.2012.
14. Максимов, С.П. Повышение эффективности формообразования профильных соединений на базе «треугольника Рело» : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С.П. Максимов. – Челябинск, 2005. – 184 л.
15. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
16. Федотёнок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотёнок. – М. : Машиностроение, 1970. – 403 с.

Поступила 02.08.2017

SYNTHESIS AND IMPLEMENTATION OF A RATIONAL SCHEME CIRCULAR TURNING OF PARTS WITH A PROFILE IN THE FORM OF THE RELO TRIANGLE

F. PANTELEYENKO, A. DANILOV

The known methods of forming non-circular transmitting torque surfaces in the machining of workpieces with a profile in the form of the Relo Triangle considered in this article. Based on their analysis and synthesis algorithm of kinematic processing circuits are justified scheme circular turning of the relevant parts. It differs by rational distribution Executive movements shaping and dividing between the tool and the workpiece. The proposed scheme circular turning ensures the productivity and continuity of the process processing profile details. Options for implementation of the proposed scheme profiling non-circular surfaces on a universal and on a dedicated machine are developed. Kinematic structure of machine tool for processing of details such as shafts profile in the form of the Relo polygon are designed.

Keywords: *the Relo polygons, shaping, circular turning, processing circuit, machine tools and tools.*

УДК 621.91.01

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗАНИЕМ

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;
Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ; Г.И. ГВОЗДЬ
(Полоцкий государственный университет);
д-р техн. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

Проанализированы кинематические особенности обработки сферических поверхностей вращающимся инструментом на высокой скорости резания, формирование поверхности резания и срезаемого слоя, изменение углов лезвия в процессе резания. Приведены результаты экспериментальных исследований физических характеристик срезаемого слоя, микрорельефа и микротвердости получаемой поверхности детали, в том числе после нанесения покрытия из TiN ионно-плазменным методом, подтверждающие снижение высоты неровностей и повышение микротвердости по сравнению с традиционными методами получения сферических поверхностей.

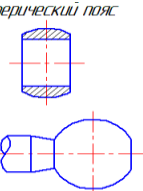
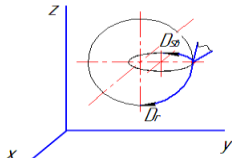
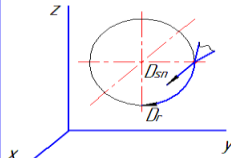
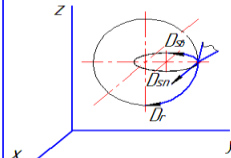
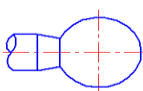
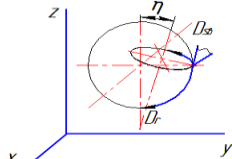
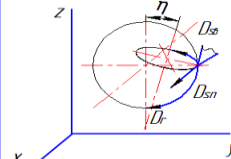
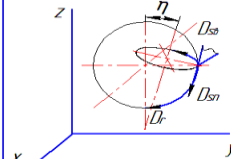

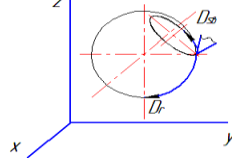
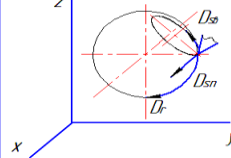
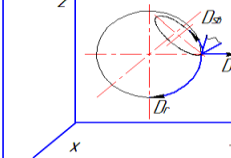
Ключевые слова: сферическая поверхность, комбинированная обработка, кинематические особенности, микрорельеф, микротвердость.

Введение. К деталям, контактирующим в узлах трения по сферическим поверхностям, предъявляются повышенные требования по их износо- и коррозионной стойкости [1]. В работах [2; 3 и др.] предлагается для улучшения эксплуатационных свойств таких деталей нанесение на их поверхности путем пластического деформирования (накатывание) и резания (лезвийная и абразивная обработка) регулярного микрорельефа. В данной работе для этих целей используется способ механической обработки резанием, реализуемый на универсальных и специальных станках, оснащенных скоростным приводом (частота вращения 10000 мин⁻¹ и более) [4], а также ионно-плазменная обработка в вакууме [5].

1. Кинематические и геометрические особенности формирования сферических поверхностей

Способ реализуется по одной из кинематических схем резания, представленных в таблице 1.

Таблица 1. – Кинематические схемы комбинированной обработки резанием сферических поверхностей деталей

Форма сферической поверхности	Кинематическая схема резания		
	Чистовая обработка	Черновая обработка	
сферический пояс 	двухэлементная схема 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема 
сферический сегмент 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема с продольной подачей (вдоль оси главного движения) 	трехэлементная схема с поперечной подачей (под углом η к оси главного движения) 
сферический сегмент 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема с продольной подачей (вдоль оси главного движения) 	трехэлементная схема с поперечной подачей (под углом 45° к оси главного движения) 

Обрабатываются сферические поверхности неполных форм – ограниченные плоскостью с одной или с двух сторон. Кинематическая схема резания может быть двух- и трехэлементной (соответственно два вращательных движения; два вращательных и одно поступательное движение), реализуемая на трех переходах операции формообразования сферы. На первом переходе происходит врезание вращающегося инструмента во вращающуюся заготовку (черновая обработка), причем направление поступательного движения врезания (подача) D_{sn} происходит по оси главного вращательного движения инструмента D_r . Ось вращательного движения подачи заготовки D_{sv} направлена под углом η к оси главного вращательного движения, то есть реализуется одновременно вид осевой обработки – зенкерование, так как инструмент имеет три и более лезвий, и вид фрезерования. На втором переходе происходит выхаживание поверхности (получистовая обработка) и реализуется двухэлементная кинематическая схема резания с главным вращательным движением инструмента D_r и вращательным движением подачи заготовки D_{sv} . На третьем переходе, когда лезвия инструмента выходят на требуемый размер сферы, реализуется выглаживание (чистовая обработка) поверхности сферы. На этих переходах возможно наряду со встречным движением D_r и D_{sv} их попутное вращение, что будет способствовать более качественному выглаживанию поверхности.

При двухэлементной кинематической схеме траектория резания представляет собой циклоиду, наведенную на окружность сферы (рисунок 1), а при трехэлементной схеме резания траектория резания представляет собой циклоиду, наведенную на окружность сферы по спирали (рисунок 2). В связи с малыми скоростями движений подачи D_{sv} и D_{sn} форму одного витка циклоиды можно рассматривать как окружность.

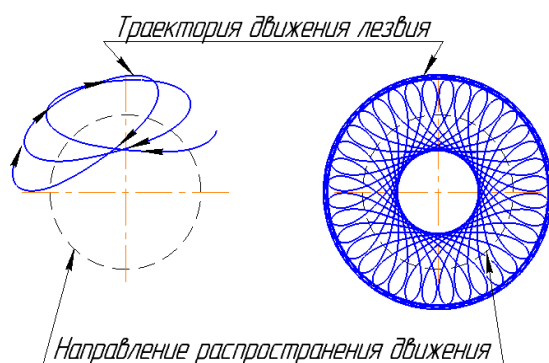
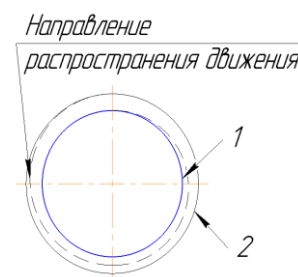


Рисунок 1. – Траектория при двухэлементной схеме резания



1 – получаемая сферическая поверхность;
2 – поверхность заготовки
Рисунок 2. – Траектория при трехэлементной схеме резания

На рисунке 3 представлена развертка сферической поверхности детали на плоскость с длиной окружности $\pi D_{сф}$ и проекция развертки окружности инструмента с длиной $\pi D_{и}$ в плоскости, перпендикулярной оси ее вращения, для перехода выхаживания. Показаны направления векторов скоростей вращения инструмента v и сферы $v_{сф}$ для случая их встречного направления. При изменении направления одного из вращений будет осуществляться попутное резание. Линейная скорость точки сферы в различных ее диаметральных сечениях изменяется от максимальных значений при наибольшем диаметре (на экваторе) до нуля в полюсах сферы.

При переходе от трех- к двухэлементной кинематической схеме резания изменяется величина и направление в пространстве результирующей скорости резания (рисунок 4) за счет включения и отключения поступательного движения D_{sn} . Это приводит к изменению положения отсчетных для определения углов инструмента плоскостей, в частности рабочей плоскости P_s-P_s .

При врезании инструмента в заготовку за счет скорости поступательного движения \vec{v}_{sn} режущая кромка, связанная с углом в плане φ участвует в срезании наибольшей стороны сечения срезаемого слоя, то есть является участком главной режущей кромки. На переходе выхаживания, когда поступательное движение D_{sn} отсутствует, положение рабочей плоскости изменяется (положение $P_{sv}-P_{sv}$) и вспомогательный угол в плане φ принимает меньшее значение по сравнению с φ . Как известно, значения углов φ_1 и φ_2 приводят к снижению формируемых неровностей на поверхности сферы. Изменение значений передних и задних углов лезвия в диапазоне принятых в работе значений $v_r \gg v_{сф}$ – незначительное (в пределах 0,25 градуса). Эти углы могут существенно изменяться в случае перехода от режима фрезерования к режиму точения сферы, когда $v_{sn} \gg v_{сф}$.

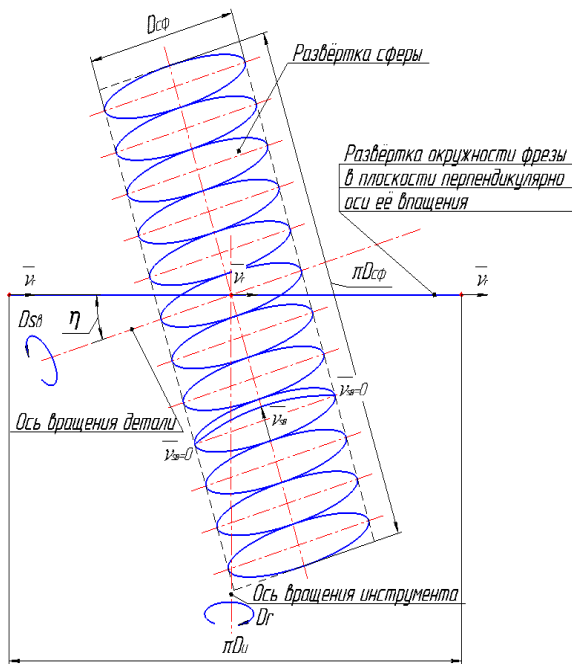


Рисунок 3. – Развертка поверхности сферы и окружности инструмента на плоскость

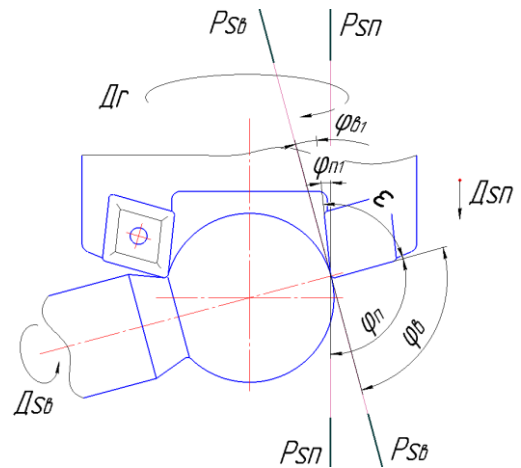
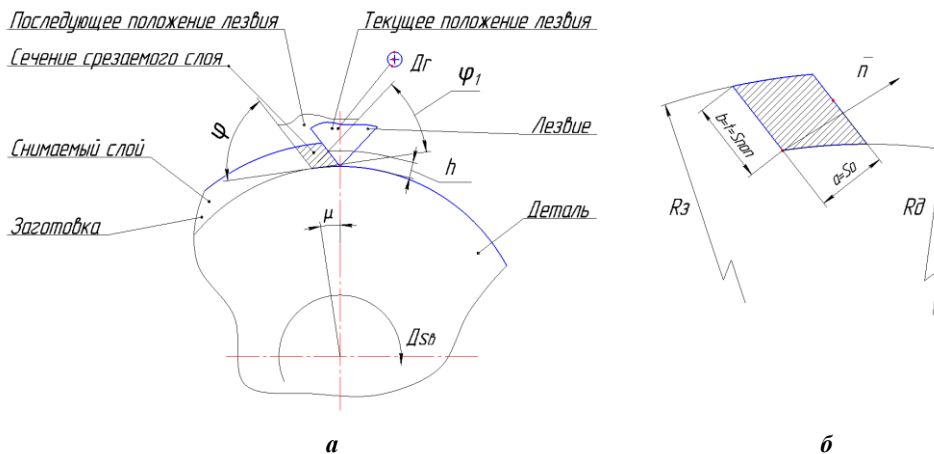


Рисунок 4. – Изменение кинематических главного φ и вспомогательного φ₁ углов в плане

Срезаемый слой формируется за один оборот инструмента в главном движении резания. Учитывая, что сферическая поверхность образуется при больших значениях скорости резания, необходимо рассматривать так называемое «мгновенное» сечение срезаемого каждым лезвием инструмента слоя (рисунок 5).



а – схема формирования снимаемого и срезаемого слоев; б – сечение срезаемого слоя

Рисунок 5. – Схемы к определению параметров «мгновенного» сечения срезаемого слоя

Срезаемый слой будет формироваться по траектории резания и иметь форму «запятой», толщина которой будет зависеть от подачи на оборот S_0 и угла в плане φ и изменяться в соответствии с изменением угла μ – угла контакта вершины лезвия инструмента с заготовкой в текущий момент времени, то есть $a = \mu$. В этом случае «мгновенная» длина контакта по дуге сферы, или путь лезвия инструмента за один оборот заготовки, будет равна

$$l = \frac{D_{ин}}{n_2} \cdot n_1 \quad (1)$$

где $D_{ин}$ – диаметр инструмента; n_1 и n_2 – частота вращения соответственно инструмента и заготовки.

Площадь «мгновенного» сечения срезаемого одним лезвием слоя:

$$f = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot S_o \cdot t}{n_2} \quad (2)$$

где D_3 – диаметр заготовки, мм; S_o – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм.

При этом не учитывается площадь «гребешка» неровностей высотой h , составляющей менее 5% от общей площади сечения срезаемого слоя f .

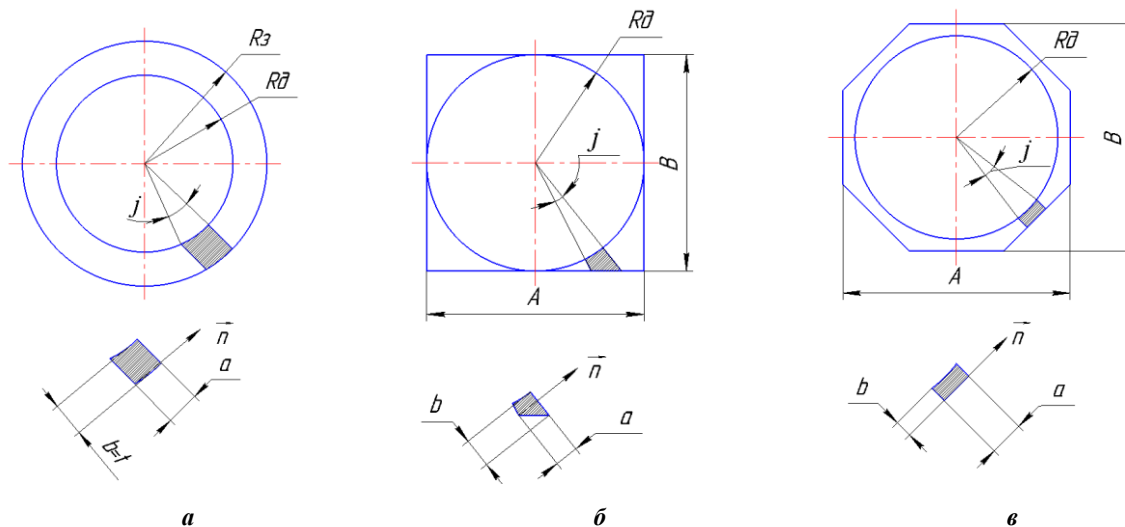
Объем резания слоя за один оборот главного движения резания

$$V_1 = \frac{f \cdot n_2}{\text{об}} \quad (3)$$

Удельный объем снятия слоя в движении подачи:

$$V_2 = \pi \cdot \dots \text{мин} \quad (4)$$

В зависимости от формы исходной заготовки (сфера, цилиндр, конус) «мгновенное» сечение срезаемого слоя лезвием инструмента на переходе врезания будет иметь различную форму (рисунок 6): прямоугольника с двумя криволинейными сторонами (рисунок 6, а); трапеции с одной криволинейной стороной (рисунок 6, б); прямоугольника с одной криволинейной стороной (рисунок 6, в).



а – сфера; б – цилиндр; в – конус

Рисунок 6. – «Мгновенное» сечение срезаемого слоя при получении сферической поверхности детали из заготовок

Во всех случаях толщина и ширина срезаемого слоя определяются по формулам:

$$a = \dots \mu \varphi \quad (5)$$

$$b = \dots \sin \mu \varphi \quad (6)$$

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя определяется по формуле

$$f = \dots = \dots \quad (7)$$

Форма поперечного сечения срезаемого слоя зависит от угла в плане φ и формы режущей кромки (рисунок 7).

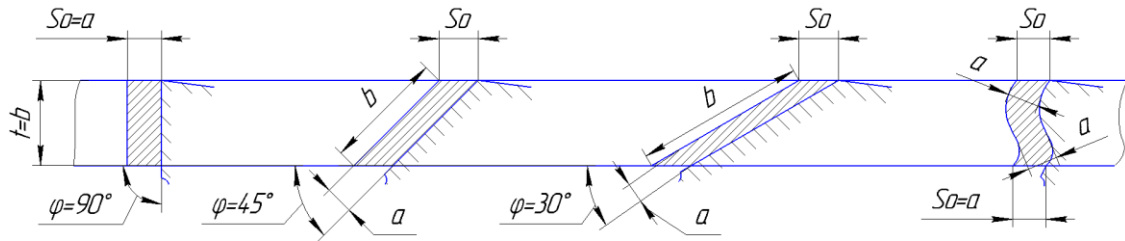


Рисунок 7. – Формы сечения срезаемого слоя в зависимости от величины угла в плане φ и формы режущей кромки

Как видно из рисунка 6, величина площади сечения срезаемого слоя $f = \dots$ независимо от формы его сечения остается постоянной. Поэтому с технологической точки зрения обработка заготовок в форме сферы, цилиндра или участками конуса будут характеризоваться одинаковой площадью сечения срезаемого слоя, определяемого подачей S_0 и глубиной резания t . Изменения толщины и ширины срезаемого слоя при изменении формы режущей кромки в данном случае не учитываются. Эти изменения следует учитывать при точных расчетах «мгновенного» сечения срезаемого слоя.

Расчет толщины и ширины сечения срезаемого слоя показывает (таблица 2), что они имеют малые значения, и с увеличением частоты вращения инструмента от 3200 мин^{-1} до 12000 мин^{-1} толщина сечения срезаемого слоя уменьшается примерно от 2 до 4 раз (рисунок 8, а). С увеличением минутной подачи инструмента толщина срезаемого слоя интенсивно увеличивается (рисунок 8, б).

Таблица 2. – Расчет толщины и ширины сечения срезаемого слоя

№ опыта	Частота вращения инструмента, мин^{-1}	Подача			Глубина резания, мм	Время обработки, с	Толщина, мм	Ширина, мм	Диаметр инструмента, мм
		минутная, мм/мин	на оборот, мм/об	на зуб, мм/зуб					
1	3200	1,183	0,0003697	0,0000616	1,335	71	0,0000615	1,3383	34,3
2	6400	0,633	0,0000989	0,0000165	0,93	38	0,0000164	0,93223	35,1
3	12050	0,583	0,0000484	0,0000081	0,685	35	0,0000081	0,6867	35,6

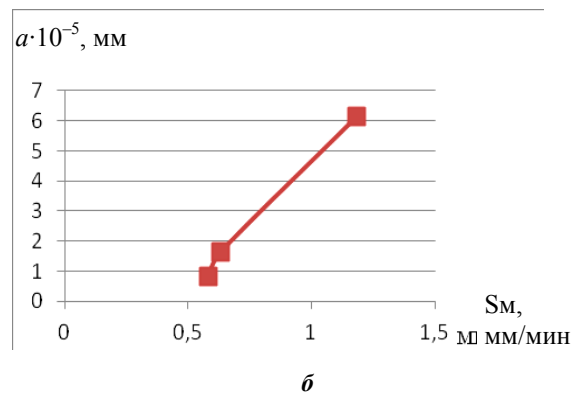
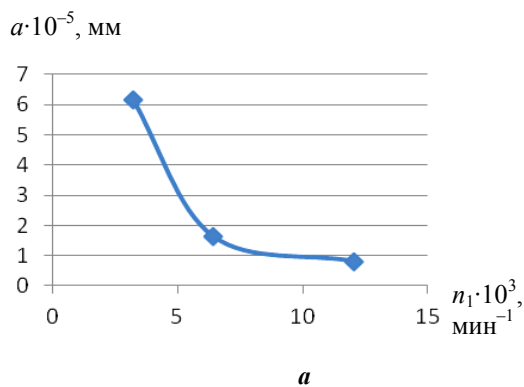


Рисунок 8. – Зависимость изменения толщины срезаемого слоя от частоты вращения (а), минутной подачи (б)

2. Технологические характеристики срезаемого слоя и обрабатываемой поверхности

Экспериментальные исследования стружки показывают, что на этапе врезания инструмента в заготовку она имеет ленточную форму вид (рисунок 9, а) длиной 3,5...7,5 мм и шириной 0,45...0,72 мм. На этапе выхаживания при больших значениях частоты вращения инструмента (12000 мин^{-1}) форма стружки – мелкодисперсная (пылевидная) (рисунок 9, б), а при затуплении инструмента и существенном возрастании температуры в зоне резания стружка «спекается» в виде капель (рисунок 9, в).

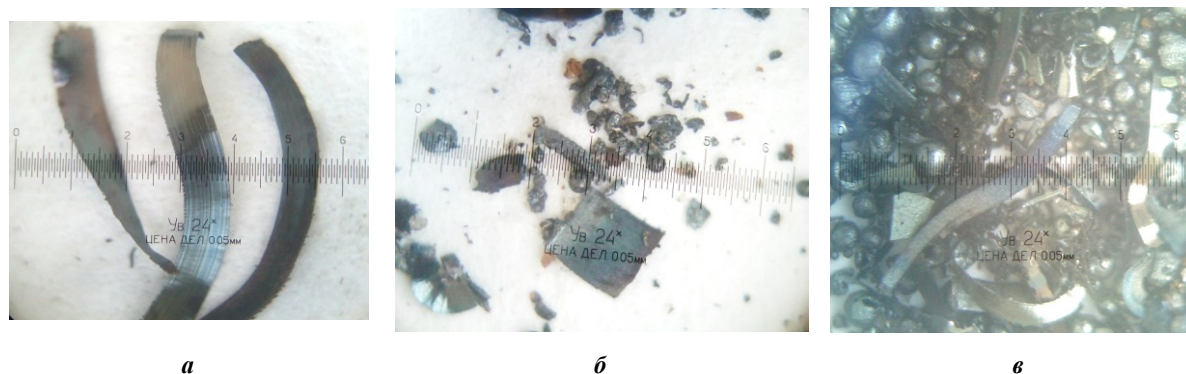
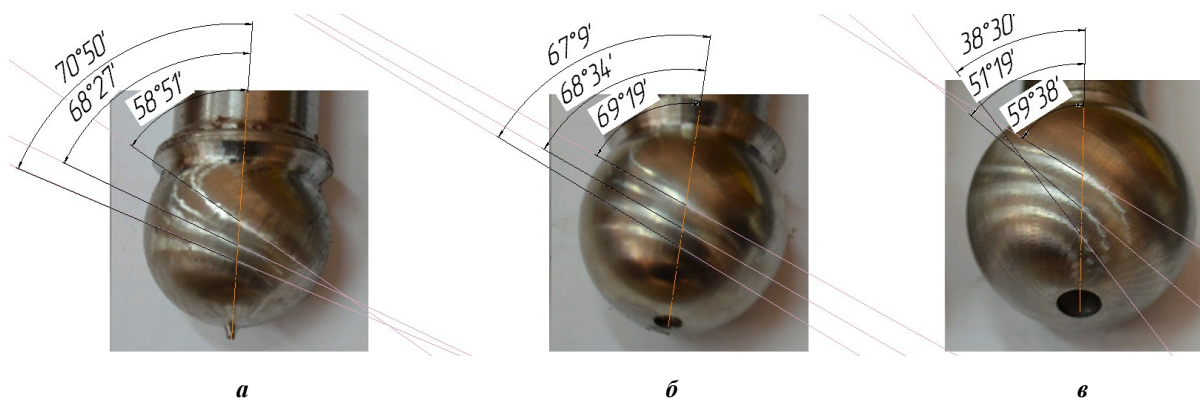


Рисунок 9. – Формы стружки на этапе врезания (а);
на этапе выхаживания (б), при работе затупленным инструментом (с)

Рассмотренные траектории резания, сечение срезаемого слоя и кинематические углы лезвия определяют формирование микрорельефа обработанной поверхности сферы (рисунок 10).



а – Ra 1,3 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 25 мм;
б – Ra 0,6 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 30 мм;
в – Ra 0,7 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 35 мм

Рисунок 10. – Шероховатость сферической поверхности детали и углы наклона линий равной шероховатости

На рисунке 10 видно, что поверхность сферы формируется в виде «сеточки» за счет пересечения траекторий движений детали и инструмента, а направление формирования одинаковых по высоте неровностей на поверхности определяется углом η наклона оси вращения детали по отношению к оси вращения инструмента и величиной скоростей вращения.

Угол наклона линий с одинаковой величиной неровностей находится в пределах $65 \dots 75^\circ$ при угле $\eta = 15 \dots 25^\circ$. Известно [6; 7], что снижению шероховатости обработанной поверхности способствует применение кругоспиральных фрез (борфрез) с углом наклона режущих кромок лезвий в данных пределах, а также ротационных инструментов, обеспечивающих угол наклона траектории резания $50 \dots 70^\circ$. Данный вывод подтверждает исследования сферической поверхности образцов на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 (рисунок 11).

На рисунке 12 четко видны неровности-риски по траектории резания, что обеспечивает низкую шероховатость поверхности в промежутке между рисками – траекториями (Ra 0,021...0,64 мкм). При этом отмечается повышение микротвердости поверхности в 1,5...3 раза по сравнению с основой – увеличение частоты вращения инструмента с 3000 до 6000 мин^{-1} приводит к увеличению микротвердости поверхности на 10...20% (таблица 3).



- а** – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$;
б – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$;
в – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$;
г – обработка резцом на токарном станке с частотой вращения $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ и подачей $S_o = 0,2 \text{ мм/об}$
 (верхний ряд – вид поверхности вблизи оси вращения (полюса сферы);
 нижний ряд – вид поверхности на максимальном удалении от оси вращения (полюса сферы))

Рисунок 11. – Образцы для исследования на атомно-силовом микроскопе

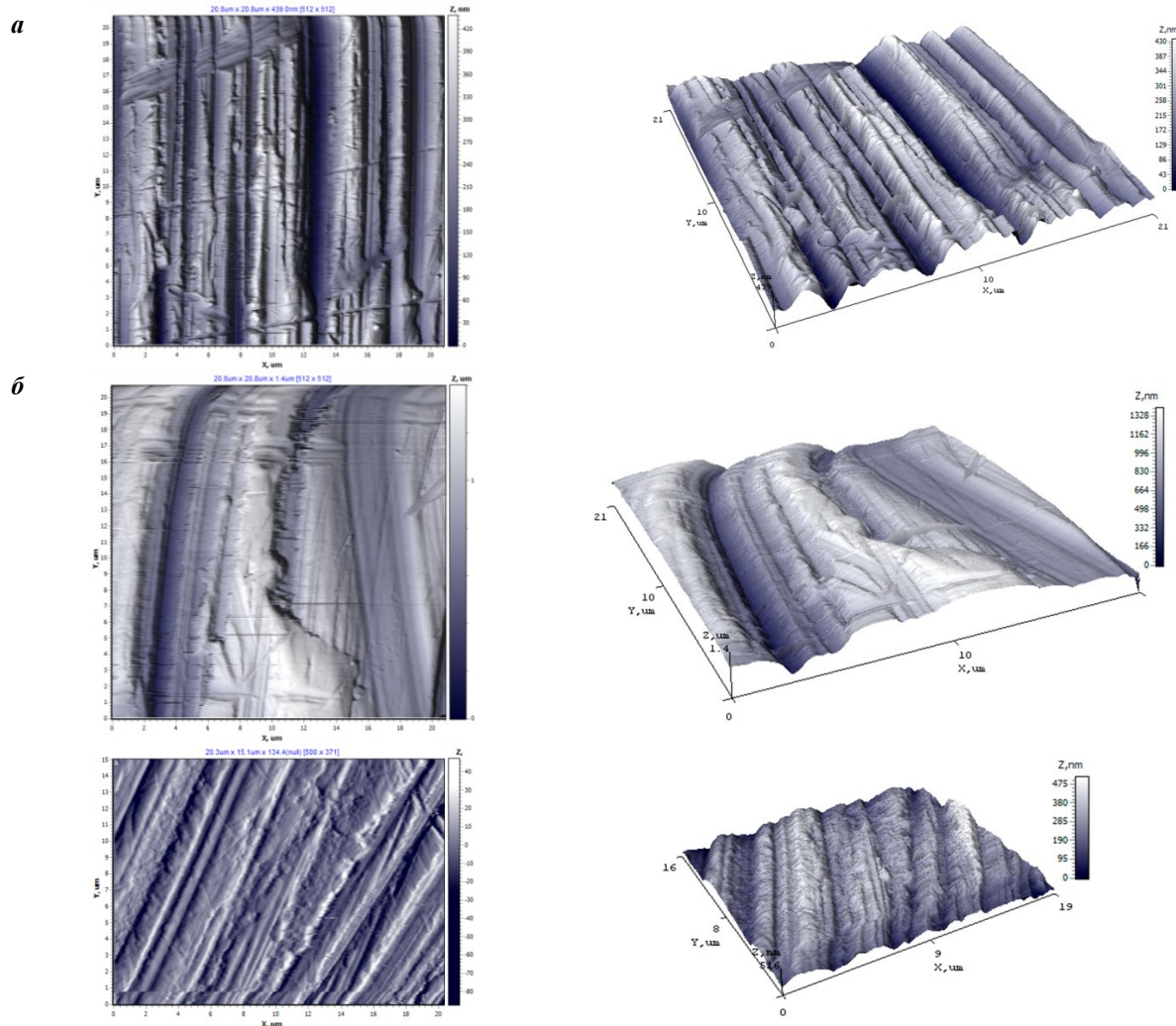


Рисунок 12. – Топография поверхности после обработки вращающимся инструментом (*а, б*); токарным резцом (*в*)

(см. также с. 23)

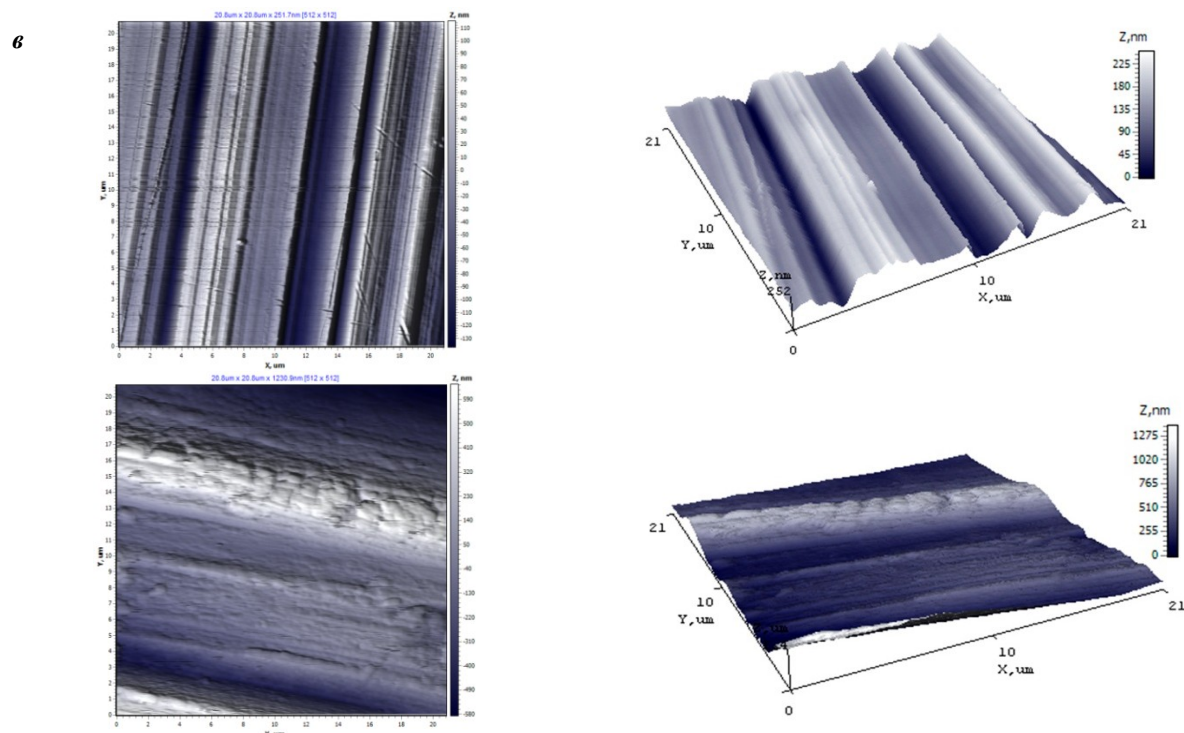


Рисунок 12. Окончание

Таблица 3. – Значение микротвердости поверхностей образцов

№ образца	Вид обработки	Режимы резания	Микротвердость, HV 0,025
Образец 1	вращающимся инструментом	$n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$	625
Образец 2			750
Образец 3	вращающимся инструментом	$n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$	780
Образец 4			850 (твердость подложки 282 HV 10)
Образец 5	вращающимся инструментом	$n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$	515
Образец 6			525
Образец 7	токарным резцом	$n = 1200 \text{ мин}^{-1}; S_0 = 0,2 \text{ мм/об}$	565
Образец 8			390 (твердость подложки 278 HV 10)

С целью повышения качества деталей на сферическую поверхность, предварительно полированную, наносилось покрытие из TiN в вакуумной камере установки PVM-0,5FN. Нанесение покрытия обеспечивает снижение шероховатости поверхности по сравнению с поверхностью без покрытия примерно в 10 раз – с Ra 56,9...176,9 до Ra 5,647...12,031 (таблица 4). Причем по мере уменьшения плотности покрытия шероховатость повышается: образец А – Ra 5,647; 6,278; 12,031; образец Б – Ra 19,271; 10,970; 10,195; образец В – Ra 259,181; 29,945; 341,140

Таблица 4. – Шероховатость образцов с покрытием TiN

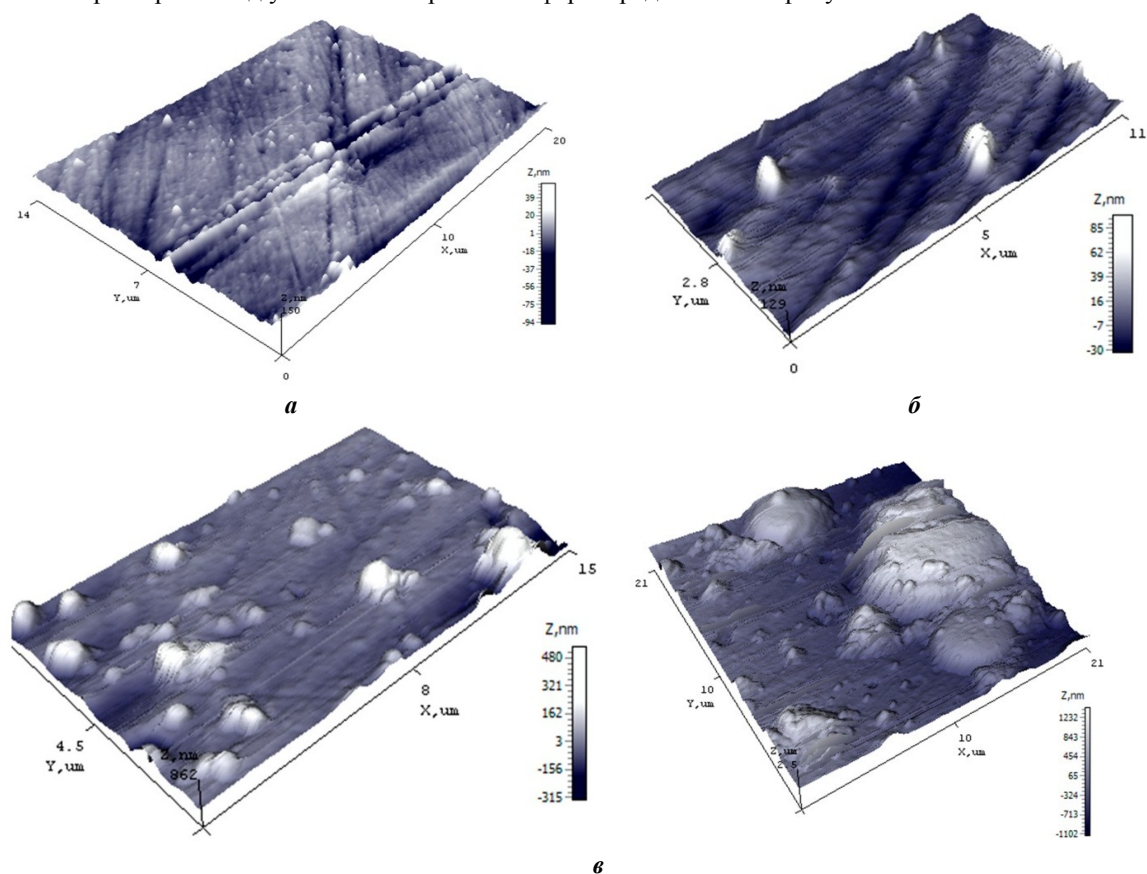
Образец А						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	5,647	5,380	6,278	4,457	12,031	6,457
Rq:	7,699	7,245	8,786	5,954	17,779	7,803
Образец Б						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	259,181	253,016	29,945	30,982	341,140	481,256
Rq:	316,278	306,588	52,396	41,530	406,016	507,758
Образец В						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	19,271	15,281	10,970	9,210	10,195	11,998
Rq:	29,292	25,509	20,590	15,324	18,832	22,289

Микротвердость различных участков сферы представлена в таблице 5. Участок с высокой плотностью покрытия имеет микротвердость 790...800 HV 0,01, с менее высокой плотностью покрытия – 750...760 HV 0,01 и малой плотностью покрытия – 650...660 HV 0,01.

Таблица 5. – Микротвердость участков сферы

Номер измерения	Маркировка образца	Микротвердость, HV 0,01
1	Образец А (блестящий)	802
2		747
3		815
4		797
Среднее значение микротвердости образца А		790...800
1	Образец Б (с отверстием)	797
2		747
3		747
4		731
Среднее значение микротвердости образца Б		750...760
1	Образец В (матовый)	656
2		634
3		647
4		673
Среднее значение микротвердости образца В		650...660

Характерный вид участков поверхности сферы представлен на рисунке 13.



а – образец А; б – образец Б; в – образец В

Рисунок 13. – Топография поверхности сферы с нанесенным покрытием TiN после обработки вращающимся инструментом

Сравнение данных значений микротвердости с микротвердостью сферы без покрытия (см. таблицу 5) показало, что покрытие обеспечивает повышение микротвердости в среднем на 100 HV 0,01.

Выводы:

1) формирование регулярного микрорельефа на сферических поверхностях контактируемых деталей путем применения комбинированной скоростной обработки вращающимся инструментом способствует улучшению эксплуатационных свойств узлов трения;

2) при комбинированной скоростной обработке сферической поверхности детали реализуются переходящие друг в друга трех- и двухэлементные кинематические схемы резания, соответствующие переходам врезания, выглаживания и выхаживания, что приводит к изменению положения в пространстве и величины результирующей скорости резания, оказывающей существенное влияние на характеристики процесса резания;

3) установлено, что траектории движения инструмента и детали при двух- и трехэлементной схеме резания пересекаются и образуют на сферической поверхности «сетчатый» рисунок;

4) сечение срезаемого слоя на различных переходах имеет разную форму, что оказывает влияние на форму остаточных неровностей (гребешков) на обработанной поверхности сферы. Определены параметры «мгновенного» сечения срезаемого слоя в главном движении резания и в движении подачи;

5) установлено, что при частоте вращения $12\,000\text{ мин}^{-1}$ и минутной подаче инструмента $0,6\text{ мм/мин}$ размеры толщины сечения стружки не превышают $0,8 \cdot 10^{-5}\text{ мм}$, а процесс резания сопровождается малыми деформациями срезаемого слоя, не оказывающими существенного влияния на деформацию микрорельефа поверхности сферы;

6) изменение в процессе резания направления вектора линейной скорости резания приводит к изменению кинематических углов в плане режущих лезвий, что влияет на формирование шероховатости обработанной поверхности. Установлено, что линии равной шероховатости на поверхности сферы наклонены под углом $65 \dots 75^\circ$ по отношению к оси вращения детали и имеют значения параметра шероховатости $Ra\ 0,6 \dots 1,2\text{ мкм}$. Исследования поверхности на атомно-силовом микроскопе подтверждают наличие линий пересечения траекторий движений инструмента и заготовки и снижение шероховатости в пределах этих линий до значения $Ra\ 0,02 \dots 0,64\text{ мкм}$;

7) улучшению эксплуатационных свойств сферических поверхностей способствует их полирование и нанесение в вакууме тонкопленочных покрытий TiN толщиной $5 \dots 10\text{ мкм}$. Установлено, что шероховатость поверхности с покрытием снижается в 10 раз по сравнению с шероховатостью без покрытия, а микротвердость поверхности повышается в $1,5 \dots 3$ раза по сравнению с основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1 : Теоретические основы. – 400 с.
2. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.
3. Чистосердов, П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. – Минск : Беларусь, 1977. – 127 с.
4. Анализ способов обработки сферических поверхностей / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
5. Попок, Н.Н. Ионно-лучевая обработка материалов азотом / Н.Н. Попок, С.В. Дербуш // Оборудование и инструмент для профессионалов : междунар. информ.-техн. журн. – 2009. – № 6. – С. 18–19.
6. Металлорежущие вращающиеся инструменты и оснастка : каталог Sandvik Coromant, 2015.
7. Попок, Н.Н. Шероховатость поверхности детали при обработке ротационным инструментом с прерывистой режущей кромкой / Н.Н. Попок // Машиностроение : сб. – Минск, 1990. – Вып. 15. – С. 18–22.

Поступила 02.08.2017

**KINEMATIC AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR FORMING
THE REGULAR MICRORELIEF OF SPHERICAL SURFACES
OF PARTS BY COMBINED CUTTING WITH CUTTING**

N. POPOK, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV, G. GVOZDZ, V. KUKAREKO

The kinematic features of the processing of spherical surfaces by a rotating tool at a high cutting speed, the formation of a cutting surface and a cut layer, and the angles of the blade in the cutting process are analyzed. The results of experimental studies of the physical characteristics of the cut sheet, microrelief and microhardness of the resulting surface of the component are presented, including after coating with TiN by the ion-plasma method, confirming a decrease in the height of irregularities and an increase in microhardness in comparison with the traditional methods of obtaining spherical surfaces.

Keywords: spherical surface, combined treatment, kinematic features, microrelief, microhardness.

УДК 621.91.04

**АНАЛИЗ СХЕМЫ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ**

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
А.Н. СЕЛИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Исследована схема обработки некруглых цилиндрических поверхностей с равномерно расположенными по окружности выступами принудительно вращающимся круглым резцом, установленным эксцентрично относительно оси его вращения. Для первой геометрической схемы ротационного резания решена задача определения толщины срезаемого слоя, когда отношение частот вращательных движений резца и заготовки равно числу выступов некруглой поверхности, а кинематический коэффициент значительно больше единицы. Графоаналитическим методом определена форма сечения среза, установлены зависимости для определения толщины срезаемого слоя и влияющих на нее параметров, учитывающих влияние геометрических параметров формируемой поверхности, отношения угловых скоростей взаимодействующих объектов (резца и заготовки) и эксцентриситета установки резца.

Ключевые слова: некруглая цилиндрическая поверхность, ротационное точение, схема установки резца, толщина срезаемого слоя, скорость резания.

Введение. Особенность ротационного точения некруглых валов эксцентрично установленным круглым резцом [1] состоит в том, что частота вращения резца больше частоты вращения заготовки в соотношении, равном числу конгруэнтных участков некруглого профиля (числу граней обработанной поверхности), вследствие чего окружная скорость резца в зоне контакта с заготовкой может в несколько раз превышать ее окружную скорость. При ротационном точении круглой цилиндрической поверхности самовращающимся резцом его окружная скорость всегда меньше, чем заготовки [2]. Кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки в зоне контакта, при обработке некруглых поверхностей в большинстве случаев больше единицы, так как его значение зависит от числа выступов формируемой поверхности и отношения диаметров заготовки и резца. Кроме того, при обработке по рассматриваемой схеме ротационный резец установлен с эксцентриситетом относительно оси своего вращения, что необходимо учитывать при определении параметров срезаемого слоя при ротационном точении некруглых поверхностей. Форма и размеры сечения срезаемого слоя зависят от принципиальной кинематической схемы резания, определяющей движения инструмента и заготовки, их взаимное расположение, форму режущих элементов. Задача определения толщины срезаемого слоя рассматривается для прямой схемы ротационного точения некруглой поверхности, когда передней поверхностью является торец круглого резца [2], а плоскость его круговой режущей кромки наклонена к оси вращения заготовки под углом λ , как показано на рисунке 1.

Согласно ГОСТ 24762-83 сечение срезаемого слоя рассматривается как фигура, образованная при рассечении слоя материала заготовки, отделяемого режущей кромкой за один цикл главного движения резания основной плоскостью; толщина срезаемого слоя – длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя; ширина срезаемого слоя – длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания. Толщина срезаемого слоя является его важнейшим параметром, так как произведение среднего ее значения и скорости резания определяет «разрешающую способность режущей кромки», характеризующую производительность метода обработки [3] и позволяющую сравнивать его по этому критерию эффективности с другими методами обработки. Поэтому решение рассматриваемой задачи при ротационном точении некруглых поверхностей имеет теоретическое и практическое значение.

Определение толщины срезаемого слоя. Задача решается в соответствии с методикой [4] для схемы ротационного точения некруглой цилиндрической поверхности с равномерно расположенными по окружности выступами эксцентрично установленным круглым резцом. На рисунке 1 показаны два положения резца, соответствующие двум оборотам заготовки, отстоящие друг от друга в направлении движения подачи на величину S_0 , и m оборотам ротационного резца (m – количество выступов некруглого профиля). Этим положениям резца соответствуют два витка поверхности резания, между которыми определяется сечение срезаемого слоя. Угловое смещение резца осуществляется по траектории результирующего движения заготовки D_r и движения подачи D_s . На рисунке 1 (вид А) показано относительное расположение резца и заготовки по направлению вектора скорости \vec{v}_{eM} без учета вращения

резца; вид *Б* – показано по направлению нормали к поверхности резания, при этом след кинематической основной плоскости расположен перпендикулярно вектору скорости резания v'_c с учетом вращения резца, а сечение срезаемого слоя – в основной плоскости.

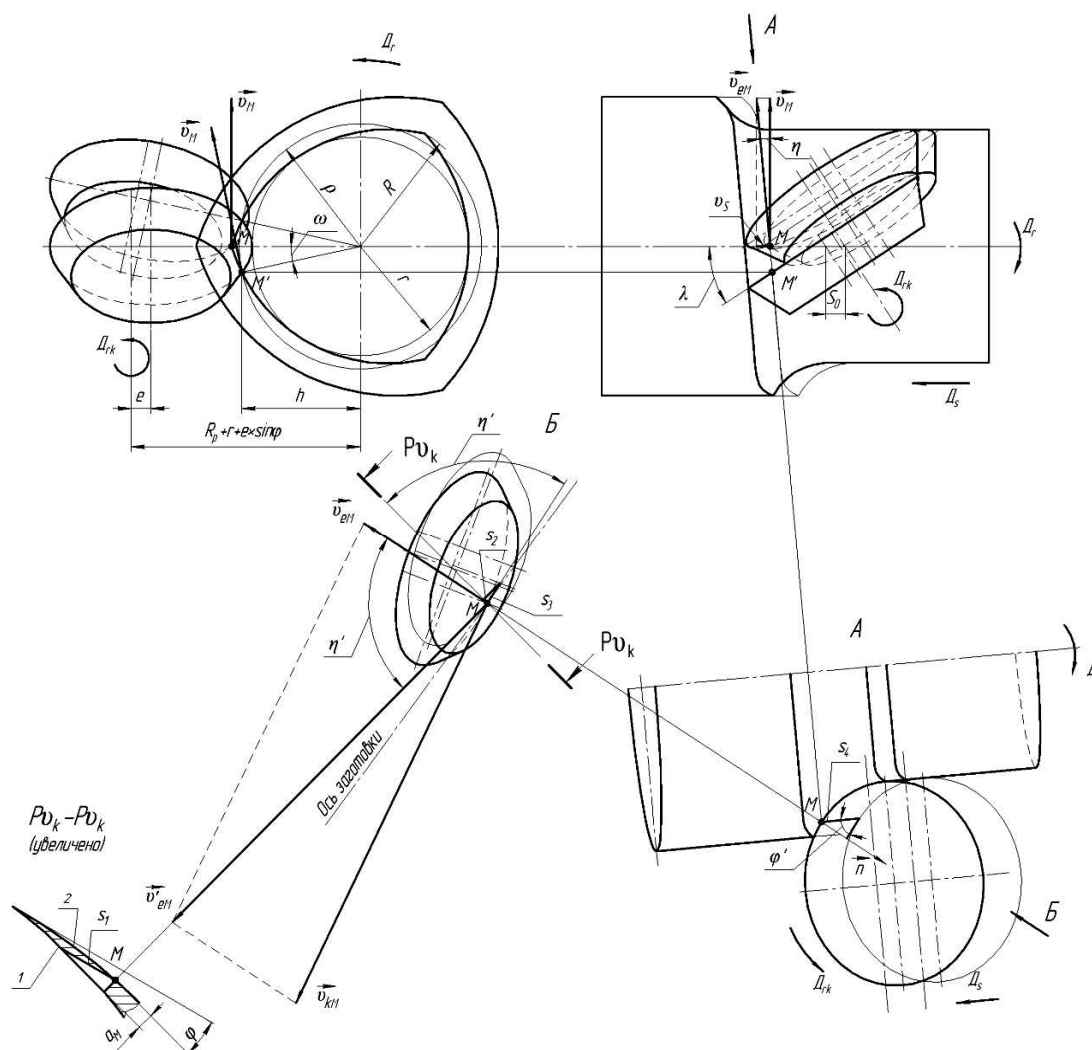


Рисунок 1. – Схема определения сечения срезаемого слоя при ротационном точении некруглых поверхностей

Через точку *M* сечения срезаемого слоя проведена нормаль \vec{n} к поверхности резания. Расстояние вдоль нормали от этой точки до предыдущего витка поверхности резания – толщина срезаемого слоя a_m . Отрезок s_1 , проведенный из точки *M*, является проекцией подачи S_0 на основную плоскость. Толщина срезаемого слоя определяется из криволинейного треугольника с вершиной *M*.

С допустимой погрешностью он заменяется прямоугольным треугольником, из которого толщина срезаемого слоя выражается зависимостью

$$a_m = s_1 \cdot \sin \varphi, \tag{1}$$

где φ – кинематический угол в плане.

Последовательно проецируя на соответствующую плоскость отрезок s_0 , можно получить аналогичные прямоугольные треугольники на каждой проекции, из которых в соответствии с рисунком 2 следуют зависимости:

$$s_1 = \frac{s_2}{\cos \varphi}, \quad s_2 = s_3 \cos \eta', \tag{2}$$

$$s_3 = s_4 \cos \varphi', \quad s_4 = s_0 \cos \eta.$$

В зависимостях (2) ϕ' – угол в плане в основной плоскости без учета вращения резца; η' – угол между векторами скорости резания v'_{em} и скорости резания без учета вращения резца v_{em} ; η – угол между векторами скорости резания без учета вращения резца v_{em} и скоростью движения v_m .

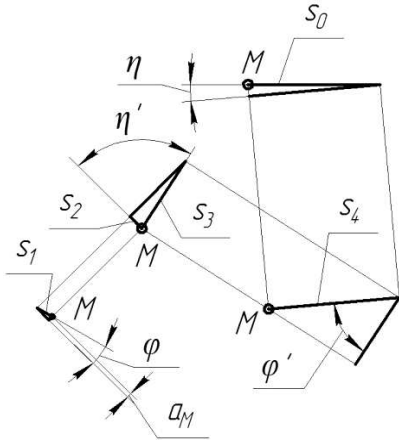


Рисунок 2. – Схема для расчета толщины срезаемого слоя

Для определения углов η и η' рассмотрим систему координат XYZ с началом в произвольной точке M режущей кромки с векторами всех скоростей и их проекциями на координатные оси (рисунок 3).

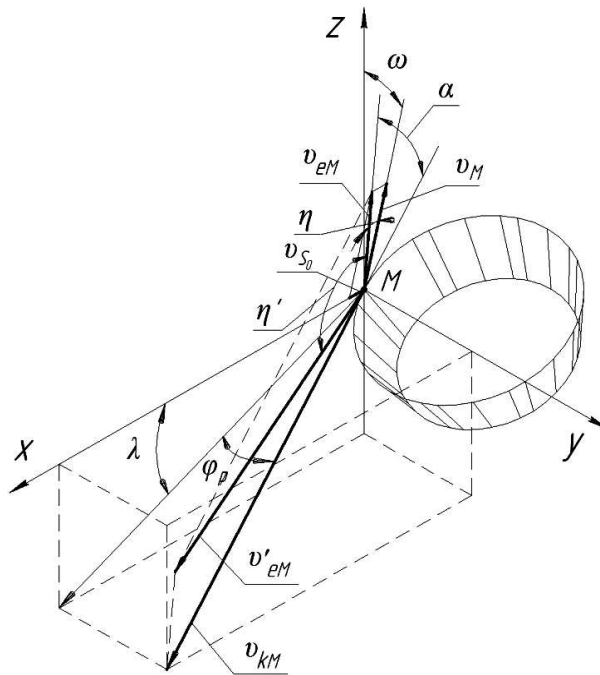


Рисунок 3. – Схема для определения углов η и η'

Примем, что ось OX проходит параллельно оси главного вращательного движения, ось OY – перпендикулярно этой оси, ось OZ – параллельно вектору окружной скорости главного вращательного движения в вершине резца. Вектор скорости резания без учета вращения резца \vec{v}_{em} равен сумме векторов скорости главного движения \vec{v}_m и скорости движения подачи \vec{v}_{S_0} ($\vec{v}_{em} = \vec{v}_m + \vec{v}_{S_0}$).

Тогда

$$\eta = \arctg \left(\frac{v_{S_0}}{v_m} \right). \tag{5}$$

Значения скоростей v_{em} и v'_{em} определяются по формулам:

$$v_{em} = \sqrt{v_{so}^2 + v_m^2},$$

$$v'_{em} = \sqrt{v_{km}^2 + v_m^2 - 2v_{km}v_m \cos \alpha}, \quad (6)$$

где α – угол между векторами скорости вращения резца v_{km} и скорости резания без учета вращения резца v_{em} .

Известно [5], что угол α между векторами определяется следующей зависимостью:

$$\cos \alpha = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}, \quad (7)$$

где x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 – проекции векторов v_{km} и v_{em} на координатные оси, определяемые по формулам:

$$x_1 = v_{km} \cos \varphi_p \cos \lambda; \quad y_1 = v_{km} \sin \mu; \quad z_1 = -v_{km} \cos \varphi_p \sin \lambda;$$

$$x_2 = v_{so}; \quad y_2 = v_m \sin \omega; \quad z_2 = v_m \cos \omega,$$

с учетом которых

$$\cos \alpha = \frac{v_{km} \cos \varphi_p \cos \lambda \cdot v_{so} + v_{km} \sin \varphi_p \cdot v_m \sin \omega - v_{km} \cos \varphi_p \sin \lambda \cdot v_m \cos \omega}{\sqrt{(v_{km} \cos \varphi_p \cos \lambda)^2 + (v_{km} \sin \varphi_p)^2 + (-v_{km} \cos \varphi_p \sin \lambda)^2} \cdot \sqrt{(v_{so})^2 + (v_m \sin \omega)^2 + (v_m \cos \omega)^2}}.$$

или

$$\cos \alpha = \frac{\cos \varphi_p \cos \lambda \cdot \delta + \sin \varphi_p \cdot \sin \omega - \cos \varphi_p \cdot \sin \lambda \cdot \cos \omega}{\sqrt{(\delta)^2 + 1}}. \quad (8)$$

В формуле (8) величина δ есть отношение скоростей движений подачи и движения заготовки в точке M , то есть

$$\delta = \frac{v_{so}}{v_m}. \quad (9)$$

Так как значение скорости v_m переменна, введем в последнее соотношение вектор скорости движения заготовки в вершине v_0

$$\delta = \xi \frac{D_o}{D_m}, \quad (10)$$

где $\xi = \frac{v_{so}}{v_0}$, D_o – диаметр обработанной поверхности; D_m – диаметр окружности, на которой расположена точка M .

Угол ω , определяющий отклонение вектора окружной скорости заготовки от оси OZ , согласно рисунку 4, найдем из уравнений:

$$\sin \omega = \frac{(R_p + e \cos \varphi_p) \cdot \sin \varphi_p \cdot \sin \lambda}{\rho}; \quad (11)$$

$$\cos \omega = \frac{R_p + R_o - (R_p + e \cos \varphi_p) \cdot \cos \varphi_p}{\rho}, \quad (12)$$

где R_p – радиус круглого резца; e – эксцентриситет его установки; φ_p – угол поворота резца; ρ – полярный радиус точки M .

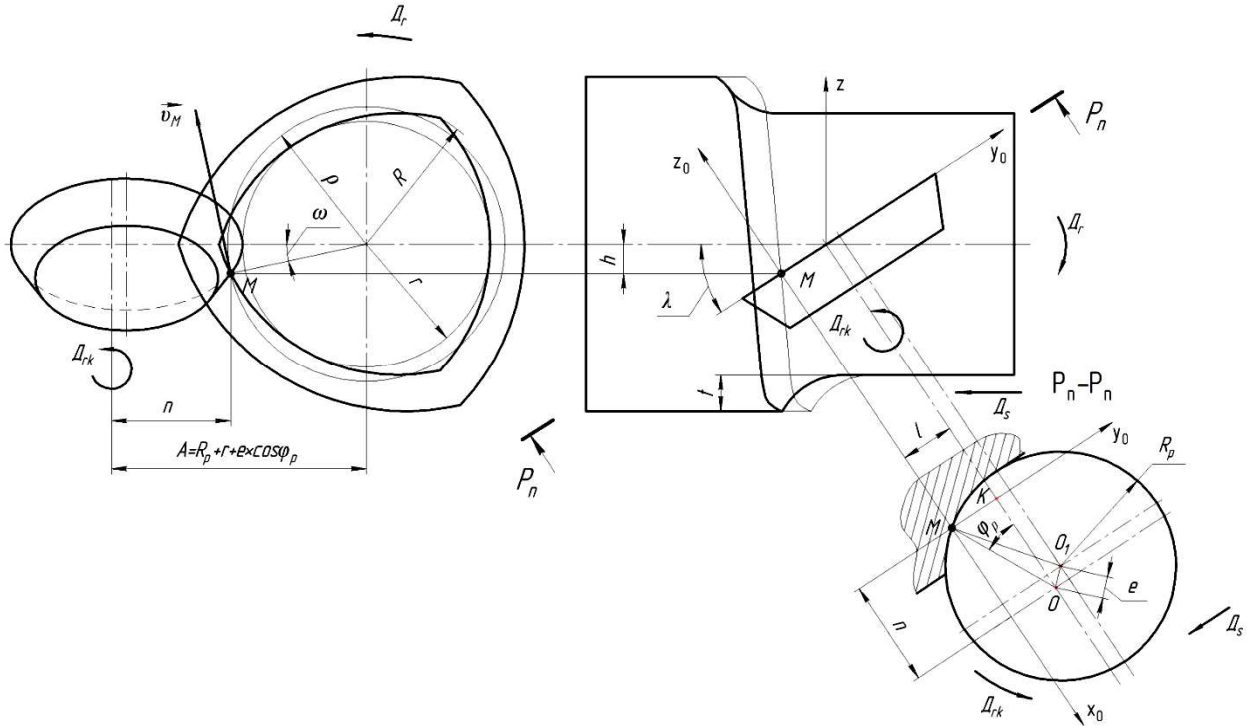


Рисунок 4. – Схема для определения угла ω

Уравнения (8), (11) и (12) позволяют вычислить угол α, а следовательно и величину скорости резания v'_{em}. Для определения угла η' между векторами v'_{em} и v_{em} на основании рисунка 1 и рисунка 3 выделим плоскость, содержащую векторы указанных скоростей и скорости вращения резца v_{km} (рисунок 5).

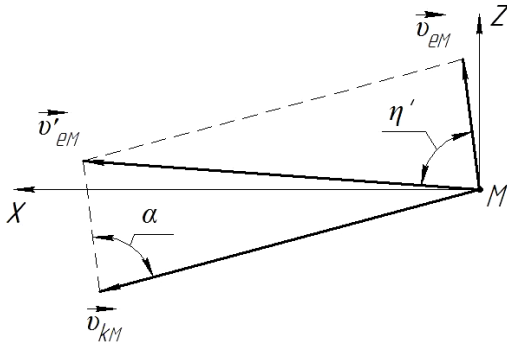


Рисунок 5. – Схема для расчета угла η'

Поскольку v_{em} = v_m cos η (см. рисунок 1), то (14) можно представить как

$$\cos \eta' = \frac{\cos \eta - \frac{v_{km}}{v_m} \cos \alpha}{\sqrt{\left(\frac{v_{km}}{v_m}\right)^2 + \cos^2 \eta - 2 \left(\frac{v_{km}}{v_m}\right) \cos \eta \cos \alpha}}, \quad (15)$$

или, учитывая, что отношение окружных скоростей инструмента и заготовки зависит от числа выступов некруглой поверхности m и эксцентриситета установки ротационного резца e, получим

$$\cos \eta' = \frac{\cos \eta - m \frac{R_p + e \cos \phi_p}{\rho} \cos \alpha}{\sqrt{m^2 \left(\frac{R_p + e \cos \phi_p}{\rho}\right)^2 + \cos^2 \eta - 2m \left(\frac{R_p + e \cos \phi_p}{\rho}\right) \cos \eta \cos \alpha}}. \quad (16)$$

Для определения углов в плане φ и φ' рассмотрим контакт резца с заготовкой в плоскости режущей кромки $P_n - P_n$ (см. рисунок 4), связав с резцом систему координат $x_0 y_0 z_0$ с началом в произвольной точке M режущей кромки. Примем, что ось x_0 лежит в плоскости режущей кромки, проходит параллельно плоскости, содержащей вектор скорости подачи v_{s0} (перпендикулярна ему), и направлена в сторону резца; ось y_0 лежит в плоскости режущей кромки, перпендикулярна оси x_0 и направлена в сторону резца; ось z_0 перпендикулярна плоскости режущей кромки и направлена от резца.

Зависимости для определения значений l и n катетов ΔMKO имеют вид:

$$MK = l = \frac{R_p + e \cos \varphi_p}{2} \sin \varphi_p; \quad OK = n = \frac{R_p + e \cos \varphi_p}{2} \cos \varphi_p. \quad (17)$$

Рассмотрим изменение координат вершин ΔMKO (рисунок 6), длин его сторон и угла φ_p в координатной плоскости $x y z$ при последовательном повороте координатной системы $x_0 y_0 z_0$ на углы $\omega, \lambda, \eta, \eta', \varphi'$.

В системе $x_0 y_0 z_0$ точки M, O, K имеют соответствующие координаты: $M(0; 0; 0), O(n; l; 0), K(0; l; 0)$. При повороте системы координат вокруг оси MY_0 (поворот в плоскости $X_0 Z_0$, рисунок 6, а) на угол ω координаты всех точек преобразуются согласно формулам [5]:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0, \\ x_1 &= x_0 \cos \omega + z_0 \sin \omega, \\ z_1 &= -x_0 \sin \omega + z_0 \cos \omega, \end{aligned}$$

где $x_0 y_0 z_0$ – «исходные» координаты; $x_1 y_1 z_1$ – «преобразованные» координаты точки (координаты в системе $x_1 y_1 z_1$).

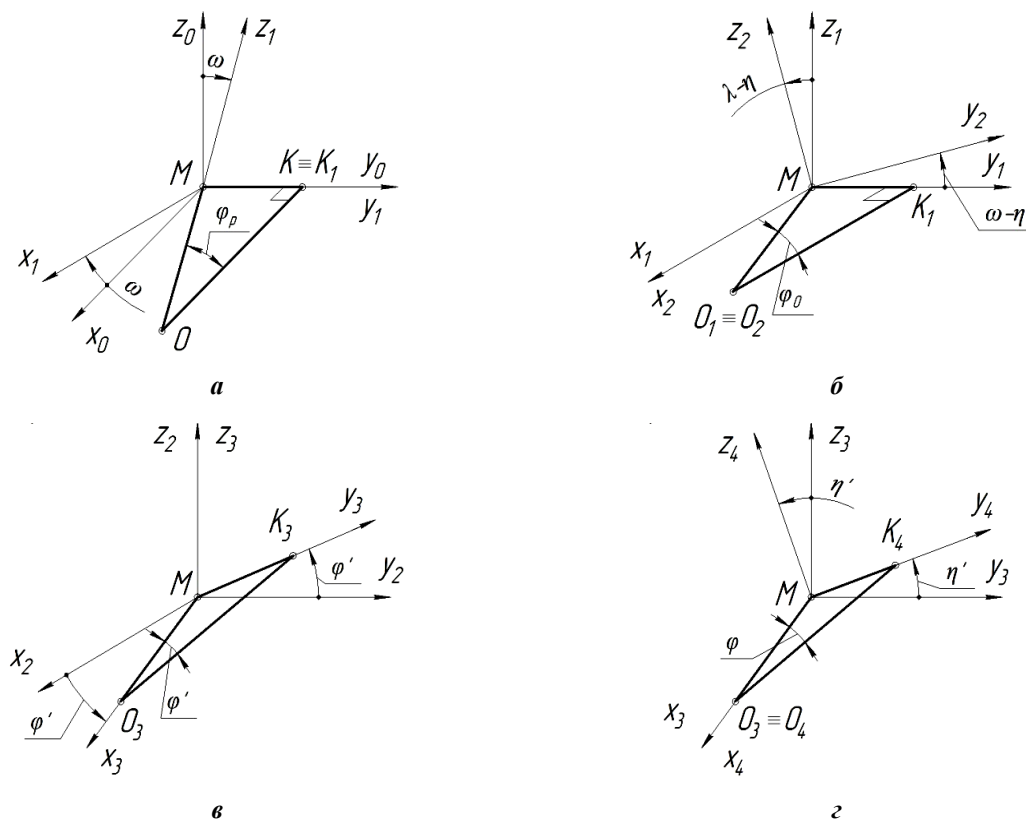


Рисунок 6. – Трансформация угла поворота резца (угла контакта) φ_p при переходе к основной плоскости

Преобразуя координаты точек O и K , имеем $O(n \cos \omega; l; -n \sin \omega)$, $K(0; l; 0)$, проецируя их на плоскость $x_1 y_1$, получим точки $O_1(n \cos \omega; l; 0)$, $K_1(0; l; 0)$.

При повороте системы координат вокруг оси MX_1 (поворот в плоскости $Y_1 Z_1$, рисунок 6, б) на угол $\lambda - \eta$ координаты всех точек преобразуются по формулам:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1, \\y_2 &= y_1 \cos(\lambda - \eta) + z_1 \sin(\lambda - \eta), \\z_2 &= -y_1 \sin(\lambda - \eta) + z_1 \cos(\lambda - \eta).\end{aligned}$$

Преобразуя координаты точек O_1 и K_1 , получаем точки $O_2(n \cos \omega; l \cos(\lambda - \eta); -l \sin(\lambda - \eta))$, $K_2(0; l \cos(\lambda - \eta); -l \sin(\lambda - \eta))$, проецирование которых на плоскость $y_2 z_2$ дает точки $O_2(n \cos \omega; l \cos(\lambda - \eta); 0)$, $K_2(0; l \cos(\lambda - \eta); 0)$.

На основании выполненных преобразований и рисунка 6, в установлена зависимость для определения угла ϕ' :

$$\operatorname{ctg} \phi' = \frac{\cos \phi_p \cos \omega}{\sin \phi_p \cos(\lambda - \eta)}. \quad (18)$$

При повороте системы координат вокруг оси MZ_3 (поворот в плоскости $X_2 Y_2$, рисунок 6, в) на угол ϕ' координаты всех точек преобразуются по формулам:

$$\begin{aligned}z_3 &= z_2, \\x_3 &= x_2 \cos \phi' + y_2 \sin \phi', \\y_3 &= -x_2 \sin \phi' + y_2 \cos \phi'.\end{aligned}$$

Преобразование координат точек O_2 и K_2 дает точки $O_3(n \cos \omega \cdot \cos \phi' + l \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'; -n \cos \omega \cdot \sin \phi' + l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi'; 0)$, $K_3(l \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'; l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi'; 0)$, проецирование которых на плоскость $x_3 y_3$ дает точки $O_3(n \cos \omega \cdot \cos \phi' + l \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'; 0; 0)$, $K_3(0; l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi'; 0)$.

При повороте системы координат вокруг оси MX_4 (поворот в плоскости $Y_3 Z_3$, рисунок 6, г) на угол η' координаты всех точек преобразуются согласно формулам:

$$\begin{aligned}x_4 &= x_3, \\y_4 &= y_3 \cos \eta' + z_3 \sin \eta', \\z_4 &= -y_3 \sin \eta' + z_3 \cos \eta'.\end{aligned}$$

Преобразуя координаты точек O_3 и K_3 , получаем точки $O_4(n \cos \omega \cdot \cos \phi' + l \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'; 0; 0)$, $K_4(0; l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi' \cdot \cos \eta'; -l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi' \cdot \sin \eta')$, проецирование которых на плоскость $y_4 z_4$ дает точки $O_4(n \cos \omega \cdot \cos \phi' + l \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'; 0; 0)$, $K_4(0; l \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi' \cdot \cos \eta'; 0)$.

С учетом выполненных преобразований из рисунка 6, г имеем

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \phi_p \cdot \cos(\lambda - \eta) \cdot \cos \phi' \cdot \cos \eta'}{\cos \phi_p \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi' + \sin \phi_p \cdot \cos(\lambda - \eta) \cdot \sin \phi'}. \quad (19)$$

Установленные зависимости позволяют определить углы η , η' , ϕ , ϕ' , необходимые для расчета значения толщины срезаемого слоя a_m при обработке некруглых цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным круглым принудительно вращающимся резцом.

Заключение. Схема ротационного точения некруглых цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом характеризуется постоянным в процессе обработки отноше-

ем угловых скоростей инструмента и заготовки, равным числу выступов профиля формируемой некруглой поверхности. Эта особенность рассмотренной схемы обработки обуславливает более высокое по сравнению с ротационным точением круглых поверхностей значение кинематического коэффициента, зависящее от числа выступов и отношения диаметров резца и заготовки. С учетом кинематического коэффициента установлены зависимости для расчета параметров рассмотренной схемы обработки некруглых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение : междунар. науч.-техн. журн. – 2012. – № 4. – С. – 71–82.
2. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроитель, 1972. – 112 с.
3. Этин, А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийными инструментами / А.О. Этин, М.Е. Юхвид – М. : АО ЭНИМС, 1994. – 185 с.
4. Ящерицын, П.И. О сечении срезаемого слоя при ротационном резании / П.И. Ящерицын, Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок // Машиностроение : сборник. – Минск : Выш. шк., 1981. – Вып. 7. – С. 36–40.
5. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – 12-е изд. – М. : Наука, 1977.

Поступила 08.08.2017

ANALYSIS OF THE ROTATION SCHEME OF NON-CIRCULAR SURFACES WITH AN EXCENTIALLY INSTALLED ROUND CUT

V. DANILOV, A. SELITSKY

The scheme of processing of non-circular cylindrical surfaces with uniformly located along the ridge protrusions by a forcibly rotating circular cutter, installed eccentrically relative to the axis of its rotation, is investigated. The problem of determining the thickness of the cut layer is solved for the first geometrical scheme of rotational cutting, when the ratio of the frequencies of the rotational movements of the cutter and the workpiece is equal to the number of protrusions of the non-circular surface, and the kinematic coefficient is much greater than unity. The shape of the section of the cut is determined by the graphoanalytical method, the dependencies for determination of the thickness of the cut layer and the parameters influencing it are determined, taking into account the influence of the geometrical parameters of the formed surface, the ratio of the angular velocities of the tool and the workpiece, and the eccentricity of the tool setting.

Keywords: *non-circular cylindrical surface, rotational turning, installation of the tool, thickness of the cut layer, cutting speed.*

УДК 669.7:624.01

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Анализируются подходы по улучшению механических свойств сварных соединений, в частности повышению их прочности. Предлагается повысить механические свойства сварных соединений за счет ограничения зоны высокотемпературного нагрева путем использования при дуговой сварке твердого диоксида углерода в качестве охладителя. Выполнено математическое моделирование дуговой сварки стыковых соединений с использованием несимметричной трехмерной модели источника тепла, в которой распределение потока тепла в области двойного эллипсоида происходит по закону Гаусса. Определено температурное поле деталей. Моделирование показало уменьшение площади зоны высокотемпературного нагрева в ходе дуговой сварки с использованием твердого диоксида углерода как охладителя. Определены значения прочности сварных соединений из аустенитной стали при различных условиях охлаждения. Установлено, что при использовании твердого диоксида углерода наблюдается увеличение прочности сварных соединений по сравнению со сваркой в обычных условиях.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, моделирование сварки, механические свойства, повышение прочности.

Введение. При производстве ответственных оболочковых конструкций в энергетическом и химическом машиностроении и т.п. широко используют коррозионностойкие стали аустенитного класса, которые допускают работу в широком интервале температур при агрессивном воздействии среды. Одним из наиболее технологичных способов получения неразъемных соединений при производстве оболочковых конструкций является дуговая сварка [1].

При изготовлении конструкций из аустенитных сталей при помощи дуговой сварки возникает немало сложностей, значительная часть которых связана с физико-механическими свойствами данных сталей. В частности, с низкой теплопроводностью аустенитных сталей связаны увеличение температуры перегрева металла и рост площади металла, находящегося при повышенных температурах. Этим свойством, а также высоким коэффициентом температурного расширения объясняется образование значительных по величине остаточных напряжений и деформаций при сварке таких сталей, влияющих на внешний вид и срок службы изделия [2]. Кроме того, за счет перегрева металла может возникать химическая неоднородность, а также может происходить образование хрупких прослоек пересыщенных фаз в сварном шве, служащих концентраторами напряжений и вызывающих ухудшение прочностных характеристик сварных швов и снижение надежности всей конструкции в целом [3].

Так как при снижении степени перегрева металла обеспечивается ограничение площади и времени пребывания металла при повышенных температурах, то одним из эффективных направлений предотвращения возникновения при сварке нежелательных деформаций и значительных напряжений, а также повышения механических свойств сварных соединений является применение принудительного охлаждения высокотемпературной области металла [4]. В этой связи выбор вида охлаждающей среды имеет особое значение, поскольку среда в значительной степени определяет режимы нагрева и охлаждения при дуговой сварке.

Распространенным охладителем при сварке является вода, она доступна, нетоксична, обладает высокой охлаждающей способностью, однако имеет ряд недостатков, которые связаны с изменением ее агрегатного состояния при использовании. Процесс отвода тепла в случае применения воды включает три стадии (пленочное кипение, пузырьковое кипение, конвективный теплообмен), каждая из которых характеризуется скоростью охлаждения, отличной от других стадий. Неодновременное формирование одинаковых стадий теплоотвода в различных участках поверхности охлаждаемой детали обуславливает разброс величин скоростей охлаждения и неравномерность распределения температур отдельных областей поверхности, возникновение значительных напряжений и деформаций в металле, а также ухудшение механических и технологических свойств сварных соединений [3].

Более равномерное охлаждение, протекающее практически в одну стадию, обеспечивается при использовании в качестве охладителя жидкого азота. Данный эффект достигается за счет газовой пленки, легко образующейся при нагреве жидкого азота и покрывающей охлаждаемую поверхность. Теплота

парообразования жидкого азота составляет 197,6 кДж/кг, что в несколько раз меньше аналогичного показателя для воды, поэтому при использовании жидкого азота имеет место не только равномерное, но и медленное охлаждение, исключающее возникновение значительных напряжений и деформаций при сварке [5]. Вместе с тем низкая охлаждающая способность жидкого азота не способна обеспечить достаточные скорости охлаждения и высокие механические свойства сварных соединений из аустенитной стали.

Методика эксперимента. Показатели прочности и ударной вязкости определяли в ходе испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 6996. При этом определяли величину временного сопротивления σ_b , значение удельной вязкости разрушения KCV.

Для испытаний на прочность при растяжении использовали стандартные плоские образцы с ослабленным сечением в области сварного шва. Образцы были вырезаны в соответствии с размерами образца типа XXIV [6] из сваренных встык пластин из аустенитной стали 12X18H10T толщиной 4 мм. Выпуклость сварного шва на образцах удалялась до основного металла. Таким образом, толщина образца равнялась толщине основного металла и составляла 4 мм, радиус закругления канавок – 6 мм, минимальная ширина образца – 6 мм. Растяжение в процессе испытаний проводили на разрывной машине АЛАТОО со скоростью 2 мм/мин с фиксацией диаграммы «нагрузка – деформация».

Для испытаний на ударную вязкость изготавливались образцы размерами 55×8×4 мм с выполненным поперек основного металла V-образным надрезом глубиной 2 мм, угол раскрытия которого составлял 45°, а радиус при вершине – 0,25 мм. Поверхность основного металла образцов не обрабатывалась.

Результаты и их обсуждение. В последнее время для охлаждения тонкостенных сложных конструкций используются водные растворы органических веществ со свойством обратной растворимости. Относящиеся к таким средам раствор полиэтиленгликоля, двухкомпонентный раствор полиэтиленоксида и алкилфенола, другие подобные им растворы по охлаждающей способности значительно превосходят воду, позволяют в широком интервале варьировать скорость охлаждения нагретой детали, имеют удовлетворительную равномерность отвода тепла [5]. Вместе с тем использование данных охладителей значительно повышают себестоимость сварочных работ, существенно ухудшает условия работы сварщика.

Большие возможности совершенствования технологии сварки открываются при использовании новых эффективных сварочных материалов, к которым относится твердый диоксид углерода. Можно выделить следующие основные достоинства данного сварочного материала:

- низкую температуру, которую материал сохраняет в течение всего времени использования;
- способность переходить без образования жидкой фазы из твердого состояния в газообразное;
- высокую охлаждающую способность, которая в несколько раз превосходит аналогичный показатель для водяного льда.

Проведенные исследования показали, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке создает условия для интенсивного образования в области горения дуги смеси углекислого газа и оксида углерода. При наличии такой газовой смеси обеспечивается стабильное мягкое горение дуги, уменьшается разбрызгивание расплавленного металла, исчезает чешуйчатость поверхности сварного шва [7].

В представленной работе исследовано влияние условий охлаждения при дуговой сварке в среде аргона образцов из аустенитной стали на физико-механические свойства металла сварных швов, а именно на прочность и ударную вязкость. Для определения температурного поля свариваемых деталей проведено математическое моделирование процесса дуговой сварки как в обычных условиях, так и с охлаждением высокотемпературной области сварного шва твердым диоксидом углерода. При этом использовалась схема дуговой сварки, при которой охлаждающая среда подавалась на уже сформированные участки сварного шва на некотором расстоянии позади от перемещающейся сварочной дуги.

Значения температур в различных точках свариваемых деталей в зависимости от времени сварки определялись путем решения дифференциального уравнения теплопроводности следующего вида:

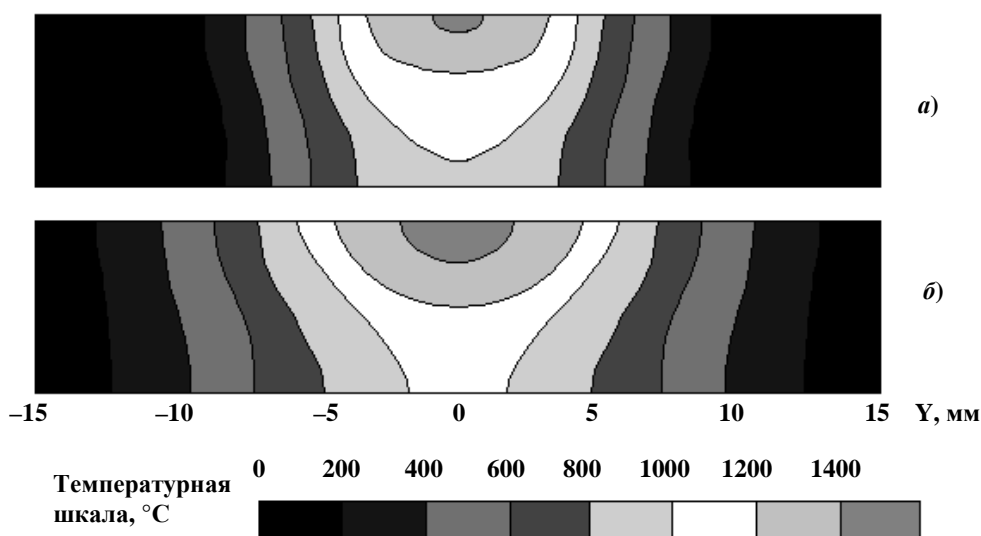
$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial z) / \partial z + Q,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; T – температура, °C; λ – теплопроводность, Вт/м·°C; Q – входящий тепловой поток, Вт/м³.

Дифференциальное уравнение в частных производных решали численным методом конечных элементов способом Ньютона – Рафсона [8; 9]. При определении температурного поля деталей от действия сварочной дуги при дуговой сварке использовалась модель источника тепла в форме двойного эллипсоида, в котором плотность теплового потока была распределена по закону Гаусса. Такой вид модели позволяет повысить точность расчетов за счет учета различных градиентов температур движущегося источника тепла, а также сократить количество и время вычислений [10].

В результате математического моделирования получены температурные поля (или значения температур) в свариваемых деталях в зависимости от времени и расстояния до сварочной дуги для различ-

ных условий сварки. Значения температур в поперечном сечении сварного шва в зависимости от расстояния до сварочной дуги отображены на рисунке.



a – с охлаждением твердым диоксидом углерода; *б* – без охлаждения

Значения температур в зависимости от расстояния (*Y*) от сварочной дуги в поперечном сечении сварного соединения, выполненного дуговой сваркой

Из приведенных данных видно, что при использовании для охлаждения свариваемых деталей твердого диоксида углерода площадь нагретого до высоких температур металла сокращается в 1,45 раза. Результаты моделирования температурного поля свариваемых деталей коррелируют с результатами макроанализа поверхности шлифов сварных соединений, по которым можно судить, что при использовании охлаждения твердым диоксидом углерода зона термического влияния в них уменьшается в среднем в 1,5 раза по сравнению со сваркой без охлаждения. Данные о механических свойствах сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и в условиях охлаждения высокотемпературной области сварного шва твердым диоксидом углерода, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Механические свойства сварных соединений

Показатель	Условия охлаждения	
	Без охлаждения	Охлаждение твердым диоксидом углерода
Прочность (σ_B), МПа	430	482
Ударная вязкость (KCV), Дж/см ²	234	273

Результаты испытаний на прочность и ударную вязкость сварных соединений из аустенитной стали свидетельствуют о следующем:

- прочность и вязкость сварных соединений, полученных дуговой сваркой без охлаждения, являются самыми низкими;
- прочность и вязкость сварных соединений, полученных дуговой сваркой с охлаждением диоксидом углерода, в 1,12 и 1,17 раза выше прочности и вязкости соответственно сварных соединений, полученных дуговой сваркой без охлаждения.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что при дуговой сварке с охлаждением диоксидом углерода обеспечивается сокращение площади зоны нагрева металла соединяемых деталей до высоких температур по сравнению с дуговой сваркой без охлаждения.

Выявлено, что за счет уменьшения тепловложения в свариваемый металл при охлаждении сварного шва твердым диоксидом углерода наблюдается уменьшение ширины зоны термического влияния по сравнению со сваркой без охлаждения. Очевидно, это произошло за счет высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода и равномерного охлаждения нагретой поверхности металла

при его использовании, что позволяет получать высокие скорости охлаждения с равномерным распределением их значений при воздействии на высокотемпературные участки сварного шва.

Определены значения прочности и ударной вязкости сварных соединений из аустенитной стали. Сварные соединения получены дуговой сваркой без охлаждения, а также дуговой сваркой с охлаждением твердым диоксидом углерода. Установлено, что прочность и ударная вязкость сварных соединений с охлаждением твердым диоксидом углерода в 1,12 и в 1,17 раза соответственно больше прочности и ударной вязкости сварных соединений, выполненных без охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Сагалевиц, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
3. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск : Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
4. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев [и др.]. – М. : Металлургия, 1983. – 280 с.
6. Сварные соединения. Методы определения механических свойств : ГОСТ 6996-66. – Опубл. : офиц. изд. – М. : Стандартинформ, 2005.
7. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер., В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Федоренко, Р.П. Введение в вычислительную физику / Р.П. Федоренко. – М. : Изд. МФТИ, 1994. – 528 с.
9. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высш. шк., 2002. – 840 с.
10. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.

Поступила 05.07.2017

INCREASING STRENGTH OF ARC WELDING JOINTS

F. PANTELEENKO, A. SHUMAV

Some approach to increase the mechanical properties of welding joints, for example strength, has been considered. It has been proposed to increase the mechanical properties by limiting on zone of high temperature heating by the use of hard dioxide carbon as a coolant. It has been accomplished the numerical simulation of arc welding of welding joints to calculate the temperature field of pieces. It has been used non-symmetric three-dimensional model of the heat source. The model had the heat flow distribution in double ellipsoid area as the Gaussian law. Numerical simulation demonstrates the decrement of zone of high temperature heating in the course of arc welding with the use of hard dioxide carbon as a coolant. Strength of welding joints of austenitic steels under different cooling conditions has been defined. It is found that the use of hard dioxide carbon had led to increasing of strength e in comparison with the strength of welding joints accomplished under usual conditions.

Keywords: *arc welding, welding joint, welding simulation, mechanical properties, increasing strength.*

УДК 621.791

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОХИРУРГИЧЕСКИХ
ИНСТРУМЕНТОВ МНОГОРАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

*канд. техн. наук А.Г. ДУБКО; канд. техн. наук Н.А. ЧВЕРТКО
(Институт электросварки им. Е.О. Патона, НАН Украины, Киев);
д-р техн. наук, проф. А.В. ЛЕБЕДЕВ*

(Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»)

Широкое внедрение в медицинскую практику тканесохраняющих электросварочных технологий требует разработки многоразового электрохирургического инструмента. Рассмотрены существующие проблемы адгезии коагулируемых тканей к поверхностям электродов электрохирургических инструментов при протекании высокочастотного тока и неравномерного нагрева контактных поверхностей этих электродов. Показано решение указанных проблем за счет применения медно-молибденового псевдосплава, который позволяет получить улучшенные физико-механические характеристики материала электродов. Применение активной составляющей тока обусловлено необходимостью коагуляции больших объемов биологических тканей. Обоснован выбор оптимального процентного содержания молибдена в псевдосплаве Си-Мо, полученном электронно-лучевым высокоскоростным испарением с последующей конденсацией. Использование этой технологии дает возможность получить материал для электродов электрохирургических инструментов многократного использования, который отвечает высоким медицинским требованиям.

Ключевые слова: *электрохирургические инструменты, живые биологические ткани, псевдосплав Си-Мо, материалы электродов, адгезия, биосовместимость, сенсibiliзирующее действие.*

Среди приоритетных научных направлений Института электросварки им. Е.О. Патона следует выделить разработку технологий и соответствующей аппаратуры для рассечения, коагуляции и соединения свариванием живых биологических тканей животных и человека с применением токов высокой частоты [1–5]. Технология получения соединений свариванием живых биологических тканей подобна технологии точечной контактной сварки металлов [6]. Аппаратура, реализующая эту технологию, состоит из источника питания и набора электрохирургических инструментов. Требования к электрохирургическим инструментам вытекают из условий их эксплуатации, а именно: стерилизационные мероприятия перед операцией; нагревание электродов инструмента высокочастотным током при его воздействии на биологические ткани; послеоперационная их обработка. Сложность разработки электрохирургических инструментов многоразового применения заключается в том, что они должны соответствовать медицинским требованиям использования разрешенных в медицинской практике материалов и безопасности их применения как для пациентов, так и для медицинского персонала.

Во избежание проблем с эксплуатацией многоразового инструмента многие производители электрохирургических инструментов изготавливают их в одноразовом исполнении.

Изготовление многоразового качественного инструмента позволит обеспечить проведение многочисленных электрохирургических вмешательств с небольшими финансовыми затратами по сравнению с применением одноразового инструмента.

В работе [7] проведен анализ недостатков медицинских электрохирургических инструментов, предназначенных для коагуляции живых биологических тканей животных и человека. В ней сформулированы основные критерии эффективности применения высокотехнологичного электрохирургического инструментария: отсутствие адгезии к белкам биоткани; отсутствие нагара на рабочих поверхностях; сверхострая режущая кромка; высокая износостойкость; получение качественных гемостаза и коагуляции.

Для устранения вышеперечисленных недостатков электрохирургического инструмента в работе [7] предложено для коагуляции кровеносных сосудов диаметром до 2,0...2,5 мм изготавливать рабочие поверхности биполярных пинцетов, непосредственно контактирующих с биологической тканью, с покрытием на основе наноструктурированного кристаллического диоксида циркония. Для того чтобы высокочастотный ток протекал через тонкий слой диэлектрического покрытия, частота электромагнитного поля должна быть не ниже нескольких мегагерц. Применение генератора с рабочей частотой свыше 3,0 МГц при толщине покрытия до 0,01 мм позволяет использовать емкостную реактивную составляющую тока для термической денатурации белка ткани.

В современной хирургической практике все чаще возникает необходимость применения токов высокой частоты для осуществления коагуляции больших объемов биологических тканей: перекрытие со-

судов диаметром более 2,5 мм, резекция тканей легкого с последующей его герметизацией, резекция печени с одновременной остановкой кровотока (коагуляцией сосудов). При таких больших объемах коагуляции биологических тканей необходимо применение активной составляющей тока. Известно, что при прохождении высокочастотного тока через проводящую среду возникает скин-эффект [8].

Многие авторы работ по математическому моделированию прохождения токов высокой частоты через электроды электрохирургических инструментов и биологическую ткань [9; 10] этим эффектом пренебрегают.

Авторами работ [11; 12] показано, что распределение плотности тока по поперечному сечению рабочей части электродов неравномерно и сосредоточено у края электрода (внутри электрода ток практически не течет). Следствием этого является градиент температур, что вызывает локальный перегрев биологических тканей. Осуществить более равномерный нагрев коагулируемых тканей и добиться отсутствия адгезии к электродам возможно применением материалов электродов, обладающих свойствами повышенной тепло- и электропроводности, например, медно-молибденовых псевдосплавов. Сплав меди и молибдена невозможно получить способом классической металлургии из-за слишком большой (более чем в 2 раза) разницы в температурах плавления этих металлов (1080 °С – медь; 2614 °С – молибден). В зависимости от соотношений примесей в составе и чистоты основных элементов можно варьировать показатели удельной теплопроводности и электропроводности электродов.

Диаграмма состояния Cu-Mo показана на рисунке 1 [13; 14]. Согласно обзорам [15; 16], медь и молибден в жидком и твердом состояниях не смешиваются между собой, а взаимная растворимость их компонентов при температуре 900 °С мала.

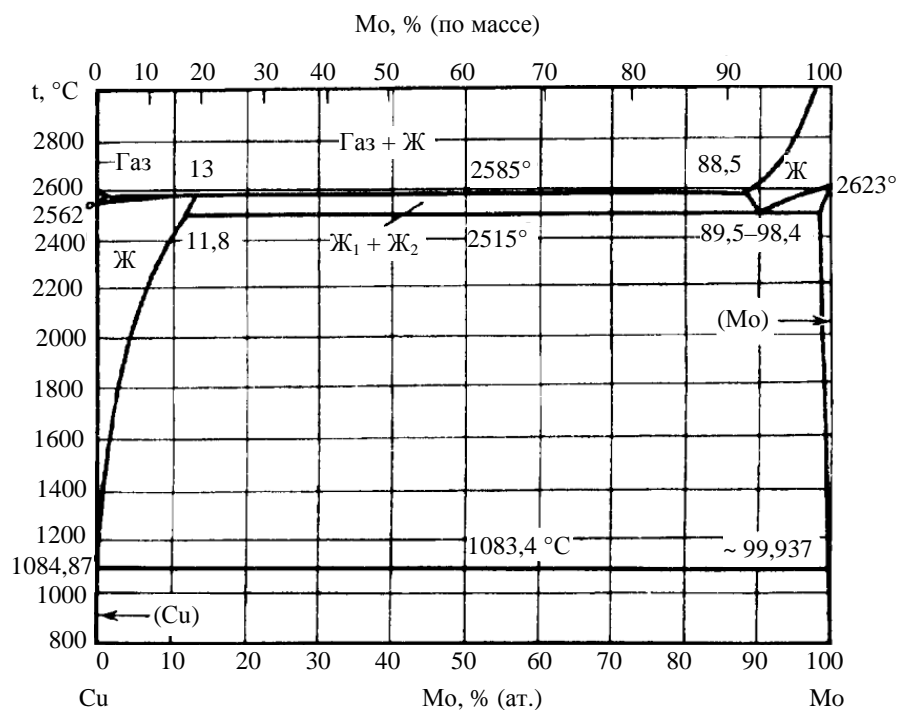


Рисунок 1. – Диаграмма состояния Cu-Mo

В работе [14] диаграмма состояния Cu-Mo построена с учетом расчетных данных, полученных с использованием термодинамических параметров [17]. В системе, согласно работам [14; 17], имеют место монотектическое и эвтектическое равновесия.

Медно-молибденовый псевдосплав получают следующими методами: методом порошковой металлургии (спеканием этих металлов) [18]; электронно-лучевым высокоскоростным испарением с последующей конденсацией в вакууме $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па (англ. physical vapour deposition, PVD-технология); напылением конденсацией из паровой (газовой) фазы) [19; 20].

При производстве медно-молибденовых псевдосплавов с помощью традиционных методов порошковой металлургии в структуре псевдосплава неизбежно присутствует равномерное распределение мелких пор. Учитывая медицинское назначение материала, из которого могут быть изготовлены электроды электрохирургических инструментов многоразового применения, наличие в нем пор недопустимо

из-за попадания в поры материала электродов биологического материала при оперативных вмешательствах и создания трудностей при стерилизации электрохирургических инструментов. Известна относительно новая перспективная технология получения медно-молибденовых псевдосплавов с помощью электронно-лучевого высокоскоростного испарения с последующей конденсацией в вакууме, которая позволяет конструировать материал на атомно-молекулярном уровне с заданной дисперсностью и распределением фаз по его толщине для получения высокоплотного состояния материала. В едином пространстве достигается термическое диспергирование расплава и консолидация дисперсного потока частиц с ограниченным содержанием примесей.

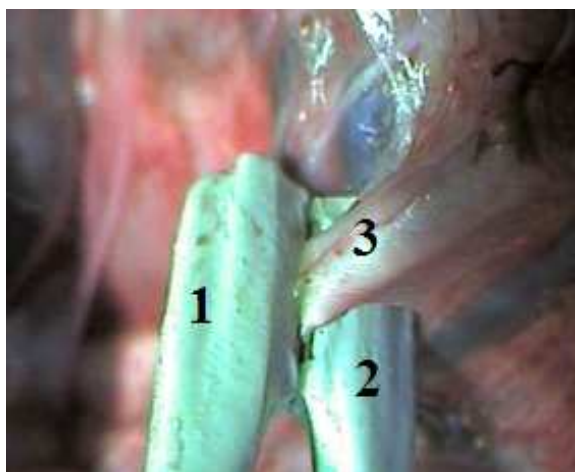
В работе [21] дано обоснование выбора состава, структуры и технологии изготовления композиционных материалов на основе системы Cu-Mo способом электронно-лучевого высокоскоростного испарения с последующей конденсацией, показаны особенности технологического процесса и реализующего его оборудования. Приведены результаты исследования структуры парофазных композиционных материалов на основе меди и молибдена, их свойств, сравнительные данные о поведении материалов различного происхождения (порошковых и конденсированных) в условиях воздействия дугового разряда. Обоснована целесообразность выбора парофазных композиционных материалов в качестве электрических контактов по сравнению с использованием порошковых композиционных материалов.

Использование PVD-технологии дает возможность получить материал для электродов электрохирургических инструментов многократного использования, который отвечает медицинским требованиям.

Из приведенных данных на диаграмме состояния Cu-Mo (см. рисунок 1) видно, что процентное содержание молибдена в псевдосплаве влияет на изменение кристаллической структуры, типа и температуры фазовых превращений компонентов и их модификацию с изменением температуры. Содержание молибдена в псевдосплаве Cu-Mo в диапазоне 10...12% позволяет получить оптимальные физико-механические характеристики материала.

Для оценки возможности применения псевдосплава Cu-Mo в электрохирургии были изготовлены электроды с содержанием молибдена ~ 12% (PVD-технология) с последующей их проверкой при высокочастотной коагуляции биологических тканей. Химический состав и процентное содержание элементов материала, из которого изготавливали электроды (Cu – 87,72%, Mo – 12,28%), определяли на микроанализаторе РЕММА-102 методом рентгеноспектрального анализа.

На рисунке 2 показано заваривание артерии диаметром 5 мм биполярным зажимом, электроды которого изготовлены из псевдосплава Cu-Mo (12,28% Mo). Внешний вид шва заваренного участка артерии с отсутствием адгезии биологической ткани к материалу электродов представлен на рисунке 3.



1, 2 – электроды; 3 – артерия

Рисунок 2. – Заваривание артерии диаметром 5 мм



Рисунок 3. – Внешний вид шва заваренного участка артерии

Для проверки безопасности применения электрохирургических инструментов, в которых используется медно-молибденовый сплав, в медицинской практике дана токсиколого-гигиеническая оценка соответствия материалов инструментов нормативным медицинским документам. Оценка биосовместимости материалов проводилась на подопытных животных (белых крысах беспородных и кроликах породы шиншилла). Сварочный инструмент погружали в емкость с дистиллированной водой, нагретой до температуры 40 °С, и выдерживали трое суток. Изучение раздражающего сенсibilизирующего дейст-

вия полученного раствора на животных проводили согласно ISO 10993-2, ISO 10993-10. Аппликации водных растворов исследуемых образцов не вызывали внешних признаков интоксикаций. При изучении сенсibiliзирующего действия экстрактов из образцов при подкожном введении через 3 дня воспалительной реакции в месте введения не обнаружено. Общее состояние животных на протяжении всего эксперимента было удовлетворительным.

По результатам проведенного исследования сделаны следующие **выводы**:

- широкое внедрение в медицину тканесохраняющих электросварочных технологий требует разработки многоразового электрохирургического инструмента;
- устранение проблемы адгезии коагулируемых тканей к поверхностям электродов электрохирургических инструментов и осуществление их равномерного нагрева возможно за счет применения медно-молибденового псевдосплава;
- обоснован выбор оптимального процентного содержания молибдена (~12%) в псевдосплаве Cu-Mo, позволяющего получить улучшенные физико-механические характеристики материала электродов;
- заваривание 5 мм артерии у животного электродами, изготовленными из псевдосплава Cu-Mo (12,28% Mo), показало отсутствие адгезии биологической ткани к материалу электродов;
- оценка биосовместимости псевдосплава Cu-Mo (12,28% Mo) на животных показала отсутствие выраженного как наружного, так и внутреннего сенсibiliзирующего действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патон, Б.Е. Электрическая сварка мягких тканей в хирургии / Б.Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2004. – № 9. – С. 7–11.
2. Максимальна міцність шва при пересіченні артерії за допомогою електросварювання / С.С. Подпратов [та ін.] // Серце і судини. – 2006. – № 4. – С. 387–389.
3. Ультроструктурные изменения сосудистой оболочки и сетчатки глаза кролика непосредственно после воздействия различных режимов высокочастотной электросварки биологических тканей / Н.Н. Уманец [и др.] // Журнал НАМН Украины. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 359–364.
4. Патон, Б.Е. Сварка и родственные технологии в медицине / Б.Е. Патон // Автомат. Сварка. – 2008. – № 11. – С. 13–24.
5. Структурні перетворення колагену при електросварюванні м'яких біологічних тканин / Б.Е. Патон [та ін.] // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 2. – С. 94–102.
6. Применение сварки в хирургии / В.К. Лебедев [и др.] // Сварочное производство. – 2008. – № 11. – С. 23–25.
7. Новый биполярный электрохирургический инструментарий на основе диоксида циркония / С.В. Белов // Медицинская техника. – 2013. – № 2. – С. 20–24.
8. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – Т. VIII : Электродинамика сплошных сред. – 623 с.
9. Tungjitkusolmun, S. Finite Element Analyses for a Study of Hepatic Cancer Tissue Destruction using Monopolar and Bipolar Radio-Frequency Ablation / S. Tungjitkusolmun // International Journal of Applied Biomedical Engineering. – 2009. – Vol. 2, iss. 1. – P. 33–38.
10. Suarez, A.G. Mathematical modeling of epicardial RF ablation of atrial tissue with overlying epicardial fat / A.G. Suarez, F. Hornero, E.J. Berjano // The Open Biomedical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 4, iss. 1. – P. 47–55.
11. Сидорець, В.М. Розподіл струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних тканин / В.М. Сидорець, А.Г. Дубко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 3. – С. 24–28.
12. Sydorets, V. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery / V. Sydorets, A. Lebedev, A. Dubko // 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2015. – P. 215–217.
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – 1024 с.
14. Subramanian P.R., Laughlin D.E. // Bull Alloy Phase Diagrams. – 1990. – Vol. 11, № 2. – P. 169–172.
15. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. Т. 2. – М. : Металлургиздат, 1962. – 1188 с.
16. Элиот, Р.П. Структуры двойных сплавов / Р.П. Элиот. – М. : Металлургия, 1970. Т. 1. – 456 с. ; Т. 2. – 472 с.

17. Brewer L., Lamoreaux R.H. // Atomic Energy Review. Special Issue № 7. Molybdenum: Physico-chemical Properties of its compounds and alloys. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 1980. – P. 195–356.
18. Композиционные материалы для контактов и электродов / Р.В. Минакова [и др.] // Порошковая металлургия. – 1995. – № 7/8. – С. 32–52.
19. Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения материалов электрических контактов и электродов / Н.И. Гречанюк [и др.] // Электрические контакты и электроды. – К. : ИПМ НАН України, 2010. – С. 54–67.
20. Mattox, D.M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing : Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control / D.M. Mattox. – Westwood, N.J. : Noyes Publications, 1998. – 917 p.
21. Композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов, конденсированные из паровой фазы. Структура, свойства, технология. Ч. 1. Современное состояние и перспективы применения технологии электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации для получения материалов электрических контактов / Н.И. Гречанюк [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2005. – № 2 (79). – С. 28–35.

Поступила 03.04.2017

IMPROVEMENT ELECTRODES OF ELECTROSURGICAL REUSABLE TOOLS

A. DUBKO, N. CHVERTKO, A. LEBEDEV

Wide introduction into medical practice of welding technology requires the development of a reusable electrosurgical tool. The problems of tissues adhesion to surfaces of the electrodes of the electrosurgical instruments during the flow of high frequency current and uneven heating of the contact surfaces of these electrodes are considered. These problems solved using copper-molybdenum pseudo alloy, which allows obtaining improved physical and mechanical characteristics of the material of the electrodes. Uniform distribution of fine pores present in the structure of the copper-molybdenum pseudo alloys. The choice of the optimal percentage of molybdenum content substantiated. The use of this technology allows obtaining material for electrodes reusable electrosurgical instruments, which meets the highest medical requirements. Lack of adhesion of biological tissue to the Cu-Mo material of the electrodes checked by 5mm diameter pig's artery welding. Evaluation of the biocompatibility of this pseudo alloy with biological objects (lab rats and rabbits) showed the absence of both internal and external pronounced sensitizing effect.

Keywords: *electrosurgical instruments, live biological tissues, Cu-Mo pseudo alloy, the materials of the electrodes, adhesion, biocompatibility, sensitizing effects.*

УДК 621.865.8

ПОИСК ТРАЕКТОРИЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В РАБОЧЕЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Л.А. ЛОБОРЕВА; канд. техн. наук, доц. М.М. КОЖЕВНИКОВ
(Могилевский государственный университет продовольствия)

Рассматривается поиск траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями. Предложены новые метод и алгоритмы поиска траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов на основе нейронной сети. Предлагаемый подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учесть сложную форму элементов роботизированной технологической ячейки. Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами моделирования.

Ключевые слова: робот-манипулятор, нейронная сеть, поиск траекторий, конфигурационное пространство.

Введение. Поиск траекторий движения роботов в рабочей среде с препятствиями – актуальная задача робототехники. Известные алгоритмы поиска траекторий позволяют эффективно решать проблему размерности конфигурационного пространства роботов [1–4], но при этом не учитывают формы препятствий и звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений. При использовании таких алгоритмов траектория робота может быть найдена за конечное время с определенной вероятностью, т.е. свойство «полноты» решения теряется [1; 5–6].

В представленной работе предложен комбинированный метод поиска траектории сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочем пространстве с препятствиями, который позволяет эффективно учесть сложную форму элементов роботизированной технологической ячейки.

Метод поиска траектории. Рассмотрим робот-манипулятор, имеющий n поворотных сочленений (рисунок 1). В рабочей зоне робота расположено некоторое множество препятствий $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, которые образуют карту препятствий.

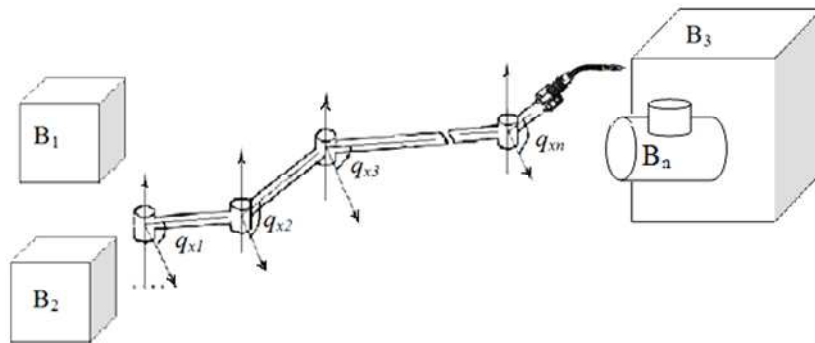


Рисунок 1. – Робот-манипулятор в рабочей среде с препятствиями B

Если конфигурационное пространство этого манипулятора дискретизировано с разрешением N , то угол в каждом из сочленений j ($j = 1:n$) может принимать дискретные значения q_{xj} ($x_j \in \{1, \dots, N\}$), при этом величины q_{1j} и q_{Nj} задают нижнее и верхнее конструктивные ограничения на углы в сочленениях.

Дискретная модель конфигурационного пространства робота представляется в виде множества из N^n векторов [7]:

$$DC = \{ \mathbf{q}_a \mid a = 1 \dots N^n \}, \quad (1)$$

где $\mathbf{q}_a = [q_{xj}]^T$ – дискретная конфигурация робота ($x_j \in \{1, \dots, N\}$); a – одномерный индекс, который определяется выражением

$$a = N^{n-1}x_1 + N^{n-2}x_2 + \dots + x_n - 3.$$

Множество свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора определяется как

$$DC_f = \{ \mathbf{q}_a \in DC \mid M(\mathbf{q}_a) \cap B = \emptyset \}, \quad (2)$$

где $M(q_a)$ – робот-манипулятор M , установленный в конфигурацию q_a .

Управляющее движение, реализующее прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями \mathbf{q}_a и \mathbf{q}_b ($a \neq b$, $\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_b \in DC_f$), задается в виде множества векторов:

$$\mathbf{d}_{ab} = \{\mathbf{d}_k | M(\mathbf{d}_k) \cap B = \emptyset\}, \quad (3)$$

где $\mathbf{d}_k = q_a + (h/Nh)(q_b - q_a)$; $h = 0:Nh$, $Nh > N$ – параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота $q_b \in DC_f$ является соседней с конфигурацией $q_a \in DC_f$, если между ними существует управляющее движение d_{ab} и индекс b удовлетворяет одному из соотношений:

$$\begin{aligned} b_1 = a - N^{n-1} &\rightarrow (x_1 - 1, x_2, \dots, x_n), b_2 = a + N^{n-1} \rightarrow (x_1 + 1, x_2, \dots, x_n), \\ \dots & \\ b_{d-1} = a - 1 &\rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_{n-1}), b_d = a + 1 \rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_{n+1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, каждая конфигурация q_a может иметь $d \leq 2n$ соседних конфигураций. Программа управления движением по траектории, соединяющей стартовую q_{s1} и целевую q_{sg} конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$ и управляющих движений между этими конфигурациями $d_{s1s2}, d_{s2s3}, \dots, d_{(sg-1)sg}$. Критерий качества управления в дискретном конфигурационном пространстве задан в виде

$$J = \sum_{k=1}^{g-1} T_{sk(s_{k+1})}(\mathbf{d}_{sk(s_{k+1})}), \quad (5)$$

где $T_{sk(s_{k+1})}$ – значение весовой функции для управляющего движения $d_{sk(s_{k+1})}$.

На конфигурационное пространство манипулятора налагаются конструктивные ограничения вида

$$q_1 \in [q_1^-, q_1^+], q_2 \in [q_2^-, q_2^+], \dots, q_n \in [q_n^-, q_n^+]. \quad (6)$$

Здесь q_i^-, q_i^+ ($i = 1 \dots n$) задают нижнее и верхнее механические ограничения на изменение обобщенных координат; n – число степеней свободы манипулятора.

Тогда внешняя граница C -свободной области робота задается в соответствии с (6), а внутренние ее границы определяются границами препятствий B , а также следующими конструктивными ограничениями:

$$CO_M(B) \equiv \{\mathbf{q} \in C_{spaceM} | (M)_q \cap B \neq \emptyset\}, \quad \{\mathbf{q}_j \in C_{spaceM}\}_{j=1}^L. \quad (7)$$

Технологический процесс также накладывает ограничения на ориентацию сварочного инструмента. Их следует учитывать при поиске траектории движения манипулятора.

Ориентация сварочного инструмента в точке сварного шва определяется углами: α – задает угол наклона плоскости движения электрода; β – ограничивает угол наклона электрода к линии шва (рисунок 2).

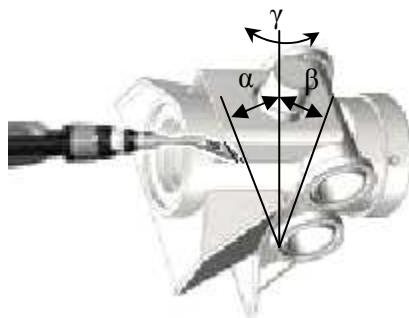


Рисунок 2. – Общий вид сварной конструкции и углы ориентации технологического инструмента

Величина углов α и β в технологическом процессе сварки может изменяться в допустимом диапазоне $\pm 10^\circ$. Угол γ совместно с углами α и β определяет ориентацию сварочного инструмента и может принимать значения в диапазоне $\pm 180^\circ$.

$$\alpha_1 \in [\alpha^-, \alpha^+], \quad \beta \in [\beta^-, \beta^+], \quad \gamma \in [\gamma^-, \gamma^+]. \quad (8)$$

Тогда задача поиска траектории движения робота-манипулятора в дискретном конфигурационном пространстве состоит в следующем. Среди всех последовательностей дискретных конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$, координаты которых лежат внутри области, ограниченной предельно допустимыми значениями углов в сочленениях q_{1j} и q_{Nj} ($j = 1:n$), найти последовательность управляющих движений, на которой достигается минимума критерий (5) с учетом технологических ограничений (6).

Величина параметра дискретизации N заранее неизвестна и подбирается в зависимости от размеров и формы препятствий в конфигурационном пространстве робота-манипулятора.

Для решения сформулированной выше задачи управления предлагается использовать метод, основанный на топологически упорядоченной нейронной сети. Эта нейронная сеть, в отличие от известных

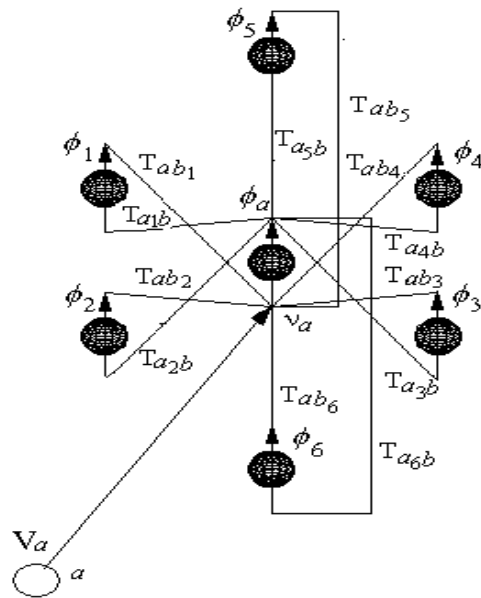


Рисунок 3. – Топологически упорядоченная нейронная сеть

типовых моделей [7; 8], представляет собой множество, состоящее из N^n нейронов, которые распределены над областью n -мерного конфигурационного пространства. Таким образом, каждой дискретной конфигурации робота q_a ставится в соответствие нейрон с индексом a , соединенный с d соседними нейронами, имеющими индексы $b_k, k = 1 \dots d$. Значения индексов b_k определяются в соответствии с выражением (4). Таким образом, каждый нейрон соответствует некоторой конфигурации робота.

Каждому управляющему движению между двумя соседними конфигурациями q_a и q_b ставится в соответствие величина весовой связи между нейронами a и b , равная T_{abk} .

Пример такой структуры для робота с тремя степенями свободы ($n = 3$) представлен на рисунке 3.

На вход нейрона a поступает 6 взвешенных сигналов от соседних нейронов $T_{ab_1} \phi_1, T_{ab_2} \phi_2, \dots, T_{ab_6} \phi_6$ (см. рисунок 3), где $T_{ab_1} \dots T_{ab_6}$ – весовые коэффициенты. Также на вход каждого нейрона a поступает внешний сигнал V_a , значение которого определяется следующим образом:

$V_a = -1$, если $q_a \notin DC_f$, либо $q_a = [q_{1j}]^T$ ($j = 1:n$), либо $q_a = [q_{Nj}]^T$ ($j = 1:n$), либо не выполнены технологические ограничения: $\alpha \notin [\alpha^- \alpha^+]$, $\beta \notin [\beta^- \beta^+]$, $\gamma \notin [\gamma^- \gamma^+]$;

$V_a = 1$, если $q_a = q_{sg}$; $V_a = 0$ во всех остальных случаях.

Распределение потенциалов ϕ_a ($a = 1:N^n$) на выходе нейронной сети с такой структурой определяет потенциальное поле робота-манипулятора в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \phi_a = f_a(v_a), \\ \tau_a \frac{dv_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^n} T_{ab} \phi_b - T_{a0} v_a + V_a, \end{cases} \quad (9)$$

где $f_a(v_a)$ – функция активации нейрона a ; v_a – значение потенциала на входе нейрона a ; ϕ_b – значение потенциала на входе нейрона b , соседнего с нейроном a ; τ_a, T_{ab}, T_{a0} – весовые коэффициенты нейронной сети.

В выражении (9) суммирование выполняется для всех $b = 1:N^n$, однако только $d \leq 2n$ элементов под знаком суммы не равны нулю, так как в данной модификации нейронной сети весовые связи имеются только между соседними нейронами.

Для уменьшения времени вычисления состояний сети предлагается в качестве функции активации нейронов использовать линейную функцию с насыщением:

$$f_a(v_a) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_a < 0, \\ v_a, & \text{если } 1 \geq v_a \geq 0, \\ 1, & \text{если } v_a > 1. \end{cases} \quad (10)$$

Такая функция активации проста для программной реализации. Так как нейроны не охвачены собственной обратной связью, линейная функция с насыщением соответствует основным требованиям, предъявляемым к функции активации: она равна нулю для нулевого входного сигнала и монотонно возрастает при положительном входном сигнале, приближаясь к единице.

Значения потенциалов, соответствующие каждой конфигурации q_a , вычисляются путем численного решения (9) на основе следующей итерационной формулы:

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left(\sum_{k=1}^D T_{ab_k} \phi_{b_k}^{(l)} + V_a \right), \quad (11)$$

где l – номер итерации; $D = 6$ для внутренних узлов сетки, налагаемой на пространство конфигураций манипулятора, и $D \in \{3, 4, 5\}$ для узлов, лежащих на границе сетки.

Величина весовых коэффициентов T_{ab_k} настраивается исходя из условий: $T_{ab_k} = 1/3n$, если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями q_a и q_{b_k} , в противном случае $T_{ab_k} = 0$. Остальные весовые коэффициенты в a -той строке матрицы T равны нулю, так как рассматриваемая нейронная сеть топологически упорядочена.

Вычисляемое по формуле (11) потенциальное поле робота является унимодальным и достигает своего максимального значения $\phi_{sg} = 1$ в точке, соответствующей целевой конфигурации q_{sg} . Тогда последовательность управляющих движений $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg}$, минимизирующая критерий качества (5), может быть найдена путем подъема в направлении градиента потенциального поля от начальной точки с потенциалом ϕ_{s1} до целевой точки с потенциалом ϕ_{sg} . Таким образом, формируется траектория перемещения манипулятора из одной заданной точки в другую без столкновений с препятствиями, с учетом технологических и механических ограничений.

Большинство современных сборочно-сварочных робототехнологических комплексов (РТК) оснащаются позиционером, позволяющим обеспечить оптимальное ориентирование сварных швов в пространстве. С целью снижения объема движений робота-манипулятора при выполнении ориентационных движений позиционера предлагается следующий подход. После выполнения технологической операции (сварки очередного шва) задается новая целевая точка, в которую должен переместиться рабочий инструмент робота. Если между такими перемещениями положение позиционера и сварного изделия не изменяется, осуществляется поиск траектории по тому же критерию (5) с использованием рассчитанного ранее потенциального поля. При поиске конечная точка предыдущей операции становится начальной, а целевой – новая точка. Потенциалы, соответствующие этим точкам в нейронной сети, меняются.

Если между соседними технологическими операциями, выполняемыми роботом, и перемещениями из старой точки к новой целевой точке будет меняться положение позиционера и сварного изделия, могут возникать две разные ситуации, требующие разных подходов к поиску траектории.

На рисунке 4 показано исходное положение сварной конструкции и ее положение после позиционирования, соответствующее объекту $BB1$, изображенному пунктиром.

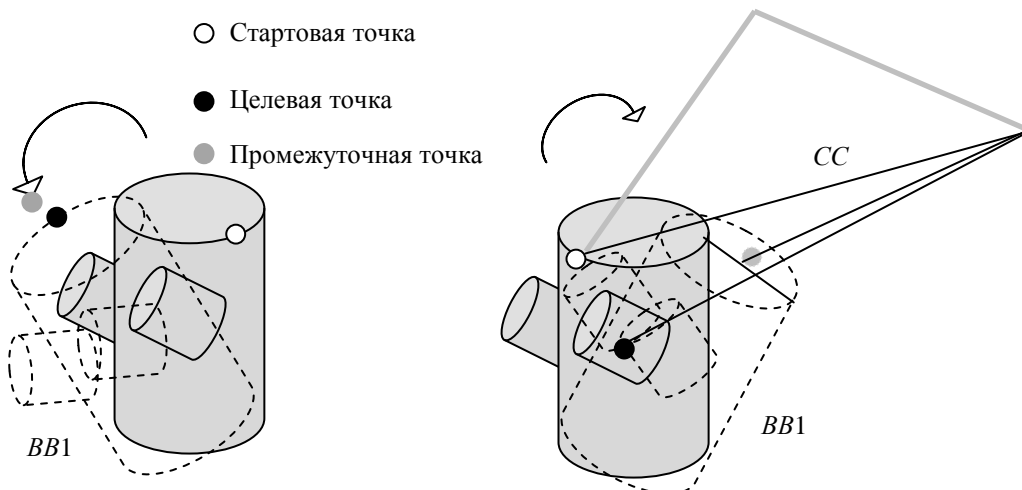


Рисунок 4. – Ориентация сварной конструкции

В первом случае после поворота позиционера новая целевая точка должна оказаться в свободном пространстве ранее сформированной карты препятствий. Для предотвращения возможного столкновения робота с позиционером или сварной конструкцией при их перемещении выбирается промежуточная це-

левая точка, которая смещается в сторону свободного пространства от конструкции на расстояние безопасного припуска, или на один шаг сетки. По ранее сформированной карте препятствий в потенциальном поле осуществляется поиск траектории к промежуточной точке. Определяется конфигурация робота в данной промежуточной точке q_{SB} . Затем в карту препятствий добавляется объект BB , образуемый геометрическим местом точек, которые занимает при движении в пространстве поворачиваемая с помощью позиционера конструкция. Далее исследуется возможность столкновения звеньев робота найденной конфигурации q_{SB} с объектом BB . Если столкновений не обнаружено, формируется траектория перемещения от старой точки к промежуточной. Затем объект BB модифицируется, принимая форму перемещенной конструкции $BB1$. Предыдущее положение сварной конструкции из карты препятствий удаляется. Согласно новой карте препятствий осуществляется пересчет потенциалов нейросети и поиск траектории от промежуточной точки к целевой. Поиск последующих точек сварного шва на изделии выполняется по карте препятствий с учетом нового положения сварной конструкции, т.е. объекта $BB1$.

Во втором случае после поворота позиционера новая целевая точка должна оказаться в пространстве, которое на ранее сформированной карте препятствий занято и является запретным. Такая ситуация вызывает сложности поиска траектории; с одной стороны, нельзя осуществить поиск по старой карте препятствий, так как целевая точка находится в запретной зоне; с другой – нельзя осуществить поиск от обратного, т.е. найти траекторию от новой целевой точки к старой, так как она тоже может оказаться в запретной зоне на модифицированной карте препятствий с учетом BB или $BB1$. Для поиска траектории необходимо найти такую промежуточную точку, к которой будет перемещаться робот и в состоянии без столкновений ожидать перемещения позиционера и сварной конструкции. Выбор оптимальной промежуточной точки с минимальной длиной траектории до нее от старой точки и от нее до новой точки – сложная задача. В силу сложности сварной конструкции и накладываемых на перемещения манипулятора ограничений геометрический расчет промежуточной точки весьма сложен. Предлагается поиск промежуточной точки на плоскости CC , которая образована тремя точками: предыдущей целевой, новой целевой и суставом «кисти» либо «локтя» робота-манипулятора. При пересечении плоскости CC и препятствия BB образуется кривая. В ее средней части выбирается точка, которая смещается на расстояние безопасного припуска, или одного шага сетки в сторону свободного пространства. Она и станет промежуточной точкой траектории. По старой карте препятствий осуществляется поиск траектории к этой промежуточной точке и определяется конфигурация робота в ней. Точки найденной траектории заносятся во временное хранение. Далее исследуется возможность столкновения звеньев робота при найденной конфигурации с объектом BB . Если столкновений не обнаружено, формируется траектория перемещения от старой точки к найденной промежуточной. Затем карта препятствий модифицируется, в нее заносится объект $BB1$ и осуществляется поиск траектории от промежуточной точки к целевой. На следующем этапе проверяются на столкновение точки для выполнения сварного шва.

Если для найденной конфигурации q_{SB} в промежуточной точке обнаружено столкновение звена робота с объектом BB , делается попытка подбора новой конфигурации q_{sBB} изменением углов сочленений этого звена с соседними. Наиболее вероятно столкновение с изделием сварочного инструмента или звена между «кистью» и «локтем». В этом случае меняются углы q_{x_i} и $q_{x_{(i-1)}}$. Если конфигурация без столкновения в промежуточной точке с объектом BB будет найдена, проверяется возможность линейного перемещения от предпоследней точки ранее найденной траектории к подобранной. Если движение невозможно, подбор продолжается.

Если за определенное количество итераций изменение углов не приводит к поиску конфигурации без столкновений, конечная точка ранее найденной траектории отбрасывается и делается попытка поиска новой промежуточной точки, которая смещается на один шаг в сторону свободного пространства. Далее повторяются проверка на столкновение с объектом BB и возможность движения от предпоследней точки ранее найденной траектории к подобранной.

При повороте стенки-экрана позиционера на 180° объект $BB = BB1$ и представляется в виде половины цилиндра, диаметр которого равен ширине стенки с допустимым припуском во избежание столкновения с манипулятором.

Алгоритм поиска траектории. Предлагаемый алгоритм состоит из нескольких модулей. Исходными данными модуля 1 являются: геометрические модели робота и препятствий (статических B и условно подвижных $BB1$); геометрические точки стартового и целевого положения манипулятора; переменная d (d принимает значение 0, если при перемещении от стартовой точки к целевой препятствия статичны; принимает значение 1, если при перемещении от стартовой точки к целевой происходит поворот позиционера и конструкции).

Сначала определяются все свободные от статических препятствий B конфигурации робота, задаются стартовая q_{s1} и целевая q_{sg} конфигурации. Если $d = 0$, программа переходит к модулю 2 для поиска

траектории в потенциальном поле нейронной сети. Если $d = 1$, рассчитывается положение промежуточной точки и определяется ее конфигурация q_{sv} . Программа для поиска траектории перемещения к промежуточной точке переходит к модулю 2, для которого значения q_{s1} и q_{sv} будут входными данными. Затем в модуле 1 определяются конфигурации робота, свободные от нового местоположения препятствия $BB1$. Программа переходит к модулю 2, для которого свободные конфигурации, значения q_{sv} и q_{sg} будут входными данными.

Для модуля 2 введем обозначения: N_0 – начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_{\max} – максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_s – шаг изменения параметра дискретизации; P – последовательность управляющих движений.

В предложенном алгоритме используются следующие функции:

$maxf(\phi_k)$ – функция, возвращающая максимальное значение потенциала ϕ из множества ϕ_k ;

$maxb(\phi_k)$ – функция, возвращающая индекс b максимального значения потенциала из множества ϕ_k ;

$q(\phi)$ – функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению потенциала ϕ ;

$explore(q(\phi_a), q(\phi_b))$ – функция проверки существования управляющего движения между двумя конфигурациями робота $q(\phi_a)$ и $q(\phi_b)$ в соответствии с формулой (3). Если такой участок траектории существует, данная функция возвращает значение «1», в противном случае она возвращает значение «0».

С учетом обозначений алгоритм расчета потенциального поля и поиска траектории для управления роботом-манипулятором имеет следующий вид.

Модуль 2

Исходные данные: геометрическая модель робота и препятствий, стартовая q_{s1} и целевая q_{sg} конфигурации

- 1: Установить начальное значение параметра дискретизации $N \leftarrow N_0$;
- 2: повторять
- 3: Вычислить V_a для параметра дискретизации N ;
- 4: Установить весовые коэффициенты нейронной сети в $T_{ab_k} \leftarrow 1/3n$ ($k = 1:d$);
- 5: повторять
- 6: Вычислить потенциальное поле ϕ_a ($a = 1:N^d$), используя формулу (9);
- 7: $a \leftarrow s1$;
- 8: повторять
- 9: $\phi \leftarrow maxf(\phi_{b_k})$;
- 10: $b \leftarrow maxb(\phi_{b_k})$;
- 11: $p \leftarrow explore(q(\phi_a), q(\phi_b))$;
- 12: $P \leftarrow \{q(\phi_a), q(\phi_b)\}$;
- 13: если $b = sg$, вернуть последовательность движений P ;
- 14: $a \leftarrow b$;
- 15: до тех пор, пока $p = 0$;
- 16: $T_{ab_k} \leftarrow 0$;
- 17: $P \leftarrow 0$;
- 18: до тех пор пока $\phi_{s1} = 0$;
- 19: $N \leftarrow N + N_s$;
- 20: до тех пор пока $N \leq N_{\max}$

Согласно алгоритму модуля 2 изначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением N_0 . При этом предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют управляющие движения, т.е. всем весовым коэффициентам нейронной сети присваивается значение $1/3n$. Далее вычисляется потенциальное поле робота ϕ_a ($a = 1:N^d$) и отыскивается последовательность управляющих движений между стартовой q_{s1} и целевой q_{sg} конфигурациями путем подъема в направлении градиента. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации q_a and q_{bk} , дискретизируются с высоким разрешением Nh в соответствии с (3), и для каждой дискретной конфигурации робота d_k выполняется тест столкновения и проверяется выполнение технологических ограничений. Если

столкновения отсутствуют и ограничения удовлетворяются, выбираются две новые конфигурации на сетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то соответствующее значение весового коэффициента сетки T_{abk} устанавливается в нуль. Затем потенциальное поле ϕ_a ($a = 1:N^n$) рассчитывается заново, и процесс поиска последовательности управляющих движений в направлении градиента повторяется. Цикл поиска повторяется до тех пор, пока последовательность управляющих движений не будет найдена, либо будет установлено, что при текущем разрешении сетки дискретизации такой последовательности не существует. В этом случае разрешение сетки увеличивается и поиск повторяется. Разрешение сетки дискретизации увеличивается до тех пор, пока последовательность управляющих движений не будет найдена либо не будет достигнуто максимально допустимое разрешение [9].

Роботизированная ячейка. Разработанный метод поиска траектории протестирован на примере роботизированной ячейки сборочно-сварочного комплекса. На рисунке 5 представлен РТК для сварки изделия «корпус редуктора», построенный на базе манипулятора ABB IRB1600, пятиосного позиционера ABB IRBP D600 и контроллера ABB IRC5. Пятиосный позиционер позволяет одновременно проводить сварочные операции, ориентируя свариваемое изделие с одной стороны ограничительной стенки-экрана, и операции загрузки-выгрузки – с другой. Сварка изделия выполняется в несколько этапов. Перед каждым из них выполняется установка и прихватка необходимых на данной стадии деталей. Установка и базирование деталей выполняется с помощью съемной оснастки.

В таких комплексах необходимо оптимизировать траектории, по которым движется манипулятор между этапами сварки, а также обеспечить обход препятствий в рабочей зоне и отсутствие столкновений звеньев робота и технологического инструмента с элементами РТК. Исходными данными для поиска траектории являются геометрические модели робота и препятствий.

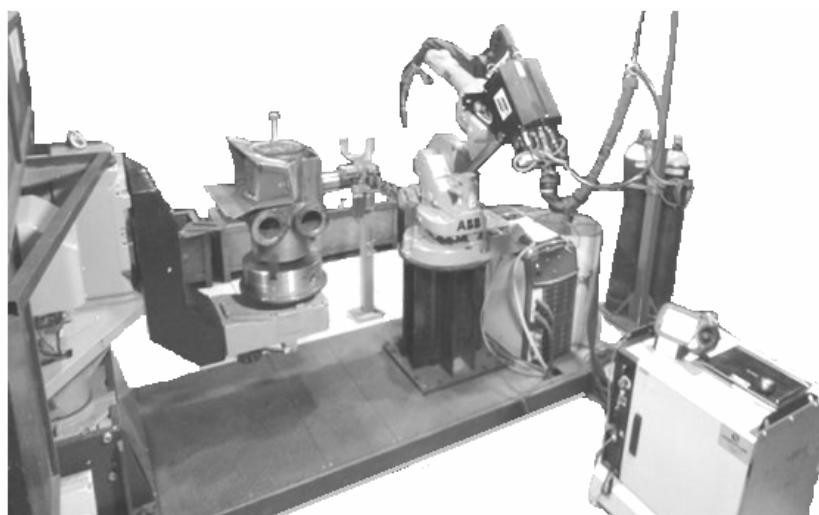


Рисунок 5. – Общий вид роботизированной ячейки

Результаты тестирования полученных траекторий показали, что предложенные алгоритмы эффективно позволяют найти свободные от столкновений траектории движения робота-манипулятора вдоль сварных швов, а также снизить объемы движений робота при выполнении позиционером ориентирующих операций.

Заключение. Предложен новый эффективный метод и алгоритм поиска траекторий роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства и обеспечивающий свойство «полноты» решения. Данный метод учитывает сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов, и ограничения, накладываемые на углы расположения технологического инструмента. Использование упрощенной функции активации нейронной сети позволяет уменьшить время расчета состояний сети и увеличить ее быстродействие. Эффективность предложенного подхода подтверждена в ходе компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salzman, O. Asymptotically near-optimal RRT for fast, high-quality, motion planning / O. Salzman, D. Halperin // In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. – 2014. – P. 4680–4685.

2. Geraerts, G.J. Reachability-based Analysis for Probabilistic Roadmap Planners / G.J. Geraerts, M.H. Overmars // *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. – 2007. – № 55. – P. 824–836.
3. Tangent bundle RRT: A randomized algorithm for constrained motion planning / B. Kim [et al.] // *Robotica*. – 2016. – 34. – P. 202–225.
4. Lavelle, S.M. On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps / S.M. Lavelle, M. Branicky, S.R. Lindemann // *International Journal of Robotic Research*. – 2004. – № 23 (7/8). – P. 673–692.
5. Pashkevich, A.P. Neural network approach to collision free path planning for robotic manipulators / A.P. Pashkevich, M.M. Kazheunikau, A.E. Ruano // *International Journal of Systems Science*. – 2006. – № 37 (8). – P. 555–564.
6. Kavraki, L.E. Motion planning / L.E. Kavraki, S.M. Lavelle. Chap. 7 in B. Siciliano and O. Khatib, ed., *Springer Handbook of Robotics*. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2016. – P. 139–158.
7. Bugmann, G. Route finding by neural nets / G. Bugmann, J.G. Tylor, M.J. Denham // *Neural Networks*. – 1995. – P. 217–230.
8. Althoefer, K. *Neuro-Fuzzy Motion Planning* / K. Althoefer. – London : University of London, 1996. – P. 120.
9. Кожевников, М.М. Нейросетевой подход к планированию траекторий промышленных роботоманипуляторов / М.М. Кожевников, А.В. Господ, Л.А. Лоборева // *Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф. 24 окт. 2012 г. – Минск : БГУИР. – 2012. – С. 86–87.*

Поступила 07.08.2017

SEARCH TRAJECTORY OF ROBOT MANIPULATORS FOR ASSEMBLY AND WELDING IN A WORKSPACE WITH OBSTACLES

L. LOBOREVA, M. KOZHEVNIKOV

The search for trajectories of assembly and welding robot manipulators in a working environment with obstacles is considered. A new method and algorithms for searching the trajectories of robot manipulators for assembly and welding based on a neural network are proposed. The proposed approach, unlike the known ones, allows to effectively take into account the complex shape of the elements of the robotic technological cell. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by the results of modeling.

Keywords: *robot manipulator, neural network, trajectory planning, configuration space.*

УДК 685.518.5

АЛГОРИТМЫ УТОЧНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА В ЗАДАЧАХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю.П. АСЛАМОВ, А.П. АСЛАМОВ; канд. тех. наук И.Г. ДАВЫДОВ; А.В. ЦУРКО
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматриваются автоматические системы вибрационной диагностики, позволяющие решать задачи оценки технического состояния роторного оборудования без привлечения экспертов. Показано, что информативные признаки дефектов в частотной области в высокой степени зависят от скорости вращения валов оборудования; в случае недостоверного определения частоты вращения основного вала это приводит к некорректной работе систем диагностики. Для повышения стабильности и точности работы автоматических систем вибродиагностики в частотной области предложены алгоритмы уточнения частоты вращения вала по сигналу вибрации без использования дополнительных устройств.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, частотная область.

Введение. В настоящее время для оценки технического состояния роторного оборудования используются методы обработки вибросигналов в частотной, временной и частотно-временной областях [1–3]. В большинстве случаев конкретному типу неисправности элемента оборудования соответствует определенная дефектная частота. Например, раковины и трещины на внутреннем/наружном кольце подшипника качения будут порождать ударные процессы с частотой повторения, равной частоте перекатывания тел качения по внутреннему/наружному кольцу (*BPFI / BPFO*) [4].

$$BPFI = F1 \cdot \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos(\theta) \right); \quad (1)$$

$$BPFO = F1 \cdot \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos(\theta) \right), \quad (2)$$

где $F1$ – частота вращения вала; Nb – количество тел качения; Bd – диаметр тела качения; Pd – диаметр делительной окружности; θ – угол контакта.

Как и в случае с подшипниками качения, большинство элементов роторного оборудования имеет дефектные частоты, пропорциональные скоростям вращения валов, на которых данные элементы установлены. Совокупность всех возможных дефектных частот оборудования образует сетку частот. На основе кинематической схемы сетка частот может быть пересчитана относительно скорости вращения первичного вала, по которому к оборудованию передается крутящий момент от мотора.

В процессе эксплуатации оборудования скорость вращения первичного вала не является постоянной величиной, вследствие изменения режима работы, нагрузки, различной степени изношенности элементов и т.д. Таким образом, сетка частот будет постоянно растягиваться или сжиматься вслед за соответствующим увеличением или уменьшением скорости вращения первичного вала. Подобные деформации частотной сетки снижают эффективность использования систем автоматической вибродиагностики вследствие увеличения вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта при анализе во временной и частотной областях.

Авторы представленной работы предлагают использовать методы уточнения частоты вращения валов роторного оборудования на основе анализа вибрационного сигнала в частотной области. Описанные в настоящей работе алгоритмы уточнения на основе спектральной интерференции и валидации информативных признаков дефектов оборудования предполагают наличие кинематической схемы оборудования. В работе кратко излагаются основы предложенных методов и приводятся результаты их применения.

Основная часть. Если допустить, что диагностируемое оборудование описывается простой кинематической схемой, состоящей из одного вала, уточнение частоты вращения вала $F1$ осуществляется в спектре виброускорения посредством поиска одного единственного пика в окрестности номинальной частоты $F1_{ном}$. Отсутствие же искомого спектрального компонента означало бы невозможность уточнения.

Однако в большинстве практических случаев степень неопределенности при уточнении частоты значительно выше вследствие высокой сложности кинематических схем, различной степени изношенности отдельных элементов оборудования, большого расстояния между датчиком вибрации и диагностируемым элементом и т.д. В этом случае сетка частот содержит большое количество дефектных частот, которые могут «размываться», перекрываться с другими, содержать ряды субгармоник, быть слабо выраженными или отсутствовать вовсе.

Зачастую корректному уточнению частоты во временной области препятствуют высокий уровень шума и слабая выраженность ударных процессов сигнала. Для большей части роторного оборудования скорость вращения вала в пределах длительности снимаемого сигнала вибрации есть величина квазипостоянная (с незначительными флуктуациями), поэтому уточнение частоты целесообразно выполнять на основе преобразования Фурье, обладающего высокой разрешающей способностью в частотной области. В данной работе рассматриваются методы на основе спектральной интерференции и валидации информативных признаков.

Дефект элемента оборудования может быть обнаружен в спектре вибрации и спектре огибающей вибрации по так называемому шаблону дефекта – специальному набору дефектных частот. По мере развития дефекта шаблон изменяется. В существующем наборе компонент происходит перераспределение энергии, появляются новые и исчезают ранее наблюдавшиеся спектральные составляющие, модуляции. Например, при дисбалансе центр масс вала не лежит на оси вращения, поэтому неуравновешенная масса, вращаясь вместе с ротором, создает гармонические колебания в опоре. Вибрация неуравновешенного ротора проявляется в виде синусоидальных колебаний с частотой вращения вала, и в спектре колебаний при этом присутствует значительный пик на частоте F_1 [3].

В другом случае наличие несоосности между ведущим и ведомым валами характеризуется набором спектральных компонент в спектре колебаний $1 \cdot F_1 \dots n \cdot F_1$, где $n < 11$, при этом доминирующими будут 1-я и/или 2-я, высокий уровень будут иметь 3-я и 4-я, а низкий $m \cdot F_1$, где $m = 5 \dots 10$.

Спектральные компоненты вала могут присутствовать как в спектре, так и в спектре огибающей виброускорения. Заключение о наличии/отсутствии дефекта вала (дисбаланса, несоосности, изогнутости, эксцентриситета, биений, ослабления креплений и т.д.), а также оценка их степени опасности делается после анализа спектров, так как появление спектральных компонент $n \cdot F_1$ может быть вызвано как самими дефектами вала, так и дефектами элементов, установленных на нем. Например, шаблон дефекта вала, обнаруженный в спектре огибающей виброускорения и не продублированный в спектре виброускорения (виброскорости или виброперемещения), во многих случаях является следствием дефектов других элементов оборудования (подшипников, зубчатых передач и т.д.) [1; 4].

С точки зрения уточнения частоты вращения вала спектр вибрации и спектр огибающей вибрации дополняют друг друга, так как наличие компонент вала в одном из них не означает появление их в другом. Методы уточнения частоты вращения вала в спектральной области основаны на допущении, что в спектре присутствует набор валовых компонент $n \cdot F_1$, $n > 1$ и флуктуации частоты вращения происходят в диапазоне

$$R(F1_{nom}, delta) = F1_{nom} [1 - delta; 1 + delta], \quad (3)$$

где $F1_{nom}$ – номинальная частота вращения вала; $delta < 0,1$ – возможное отклонение частоты вращения вала.

Авторами статьи для уточнения частоты вращения вала выбраны спектр виброперемещения и спектр огибающей виброускорения. Виброперемещение получается путем двойного интегрирования во временной области сигнала виброускорения, поступающего от акселерометра. Спектр виброперемещения обладает узкой полосой частот 0...100 Гц и содержит ярко выраженные валовые составляющие. В свою очередь, спектр огибающей виброускорения позволяет уточнить частоту по валовым компонентам, полученным в результате ударных процессов других дефектных элементов оборудования.

Уточнение частоты на основе спектральной интерференции. Пусть имеется кинематическая схема, устанавливающая взаимосвязь между N валами оборудования, и известна номинальная частота вращения первичного вала $F1_{nom}$. В таком случае может быть рассчитана номинальная частота вращения каждого вала f_i и сформирован вектор $[f_1 \dots f_N]$. Для каждого значения f_i рассчитывается вектор кратных гармоник:

$$\mathbf{f}_i = [f_{i1} \dots f_{iM}], \quad (4)$$

где $f_{ij} = j \cdot f_i$ – j -тая гармоника частоты вращения i -того вала; $M < 10$ – количество гармоник i -того вала.

На основе полученной сетки частот \mathbf{f} для каждого i -того вала в спектре виброперемещения и спектре огибающей виброускорения формируется набор кадров \mathbf{Fr}_i :

$$\mathbf{Fr}_i = [Fr_{i1} \dots Fr_{in}], \quad (5)$$

$$Fr_{ij} = S(R(f_{ij}, delta)), \quad (6)$$

где Fr_{ij} – фрагмент спектра вибрации (кадр) для j -той гармоники i -того вала; $S(f)$ – спектр вибрации.

Как следует из (3) и (6), каждый последующий кадр будет в j раз длиннее оригинала, что позволяет избежать относительного смещения валовых частот от кадра к кадру. Это значит, что если в первом кадре действительная частота f_{real} смещена относительно номинального значения f_{nom} на df , то во втором раз-

ница будет $2df$. Полученные кадры нормируются по амплитуде и длине. Выравнивание по длине осуществляется посредством сплайн-интерполяции, что особенно актуально при низкой частоте дискретизации или низкой скорости вращения вала.

Спектральная интерференция в таком случае есть процедура перемножения набора нормированных кадров i -го вала для получения узкого ярко выраженного пика:

$$SI(f_i) = \prod_{j=1}^M \overline{Fr_{ij}}, \quad (7)$$

где $\overline{Fr_{ij}}$ – нормированный по высоте и длине кадр Fr_{ij} .

При наличии набора спектральных компонент $nF1$ полученная спектральная картина будет содержать ярко выраженный пик на частоте $F1$. Влияние на результат иных спектральных компонент, не равных и не кратных $F1$, будет нивелироваться при $n > 2$. Для предотвращения размытия интерференционной картины была введена дополнительная процедура проверки кадров на количество и выраженность спектральных компонент внутри них. При несоответствии требованиям кадр отбраковывается.

Результаты интерференции для каждого вала представляют собой интерференционные картины с одним или несколькими пиками. Полученные результаты, как и спектральные кадры на предыдущем шаге, подвергаются нормированию и верификации. Спектральная интерференция полученных нормированных результатов дает интерференционную картину в окрестности частоты вращения первичного вала, а позиция максимального пика – действительную частоту вращения первичного вала.

Структурная схема предлагаемого алгоритма уточнения частоты вращения вала на основе спектральной интерференции представлена на рисунке 1.

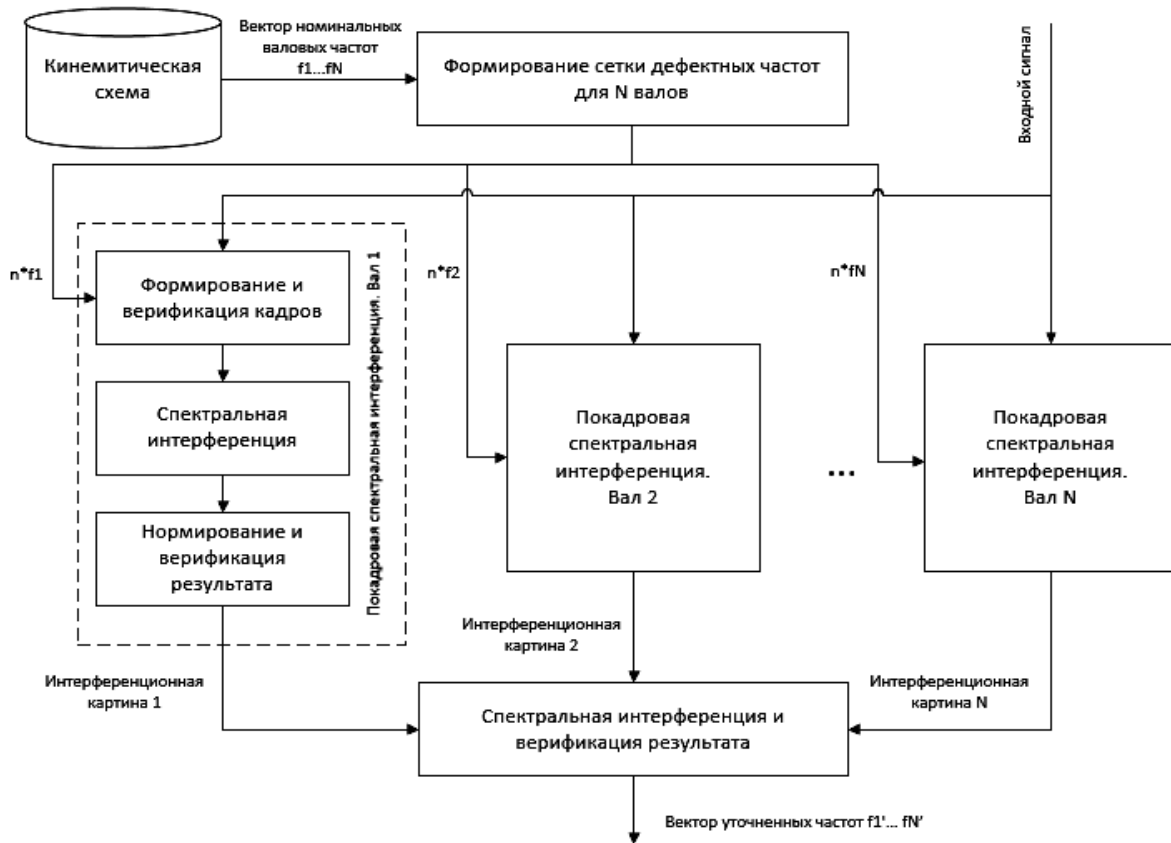


Рисунок 1. – Схема алгоритма уточнения на основе спектральной интерференции

Приведенная на рисунке 1 структурная схема применяется для анализа как спектра виброперемещения, так и спектра огибающей виброускорения. В зависимости от типа оборудования, наличия/отсутствия дефектов, их типов и выраженности, уточнение частоты может производиться в каждом спектре в отдельности и в обоих спектрах одновременно. Последний вариант обладает большей точностью и стабильностью, особенно для кинематических схем с двумя и более валами.

Уточнение частоты на основе валидатора информативных признаков. Как упоминалось выше, повышение точности и стабильности работы метода уточнения на основе спектральной интерференции достигается за счет совместной обработки в спектре виброперемещения и спектре огибающей виброускорения. В этом случае возможны следующие результаты работы алгоритма спектральной интерференции:

- 1) результаты уточнения в обоих спектрах совпадают;
- 2) уточнение возможно только в одном из спектров;
- 3) уточнение в обоих спектрах дает различные результаты;
- 4) уточнение невозможно ни в одном из спектров.

Для устранения неопределенности при принятии решений в случае 2) (при слабой выраженности пика) и случае 3) требуется дополнительный метод. Авторами статьи предложен метод уточнения частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков.

Иногда при наличии в оборудовании дефектных элементов валовые компоненты $n \cdot F1$ в спектре огибающей виброускорения либо полностью отсутствуют, либо имеют слабую выраженность. Это приводит или к некорректному уточнению частоты, или к невозможности уточнения в целом. В таком случае уточнение может быть произведено на основе анализа всей дефектной сетки частот оборудования.

Каждый класс элемента оборудования имеет набор основных дефектных частот. Например, для подшипника качения свойственны следующие частоты: $F1$ – частота вращения вала; BSF – частота вращения тела качения; $BPFO$ – частота перекатывания тел качения по наружному кольцу; $BPFI$ – частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу; FTF – сепараторная частота. Большинство дефектных частот элементов оборудования рассчитываются относительно скорости вращения вала, на котором данные элементы установлены. Таким образом, уточнение частоты можно осуществить, правильно определив дефектные частоты в спектре и переведя их в частоту вращения первичного вала. Однако сетка частот, сформированная только на векторах основных дефектных частот, недостаточна для корректного уточнения в этом случае, что обусловлено следующими факторами:

1) шаблоны дефектов могут содержать два типа спектральных составляющих: одиночные ($F1$, $BPFI$ и т.д.) и модуляционные ($n \cdot F1 - m \cdot FTF$ и т.д.). Количество и тип спектральных составляющих находится в строгом соответствии с шаблоном дефекта, поэтому для корректного составления сетки частот следует использовать базу шаблонов дефектов;

2) сетка частот всего оборудования имеет значительно больший объем составляющих, чем сетка частот валов оборудования. Это приведет к перекрытию большого количества спектральных составляющих, присваиванию неверных меток и т.д. Для верификации найденных спектральных составляющих требуется набор правил на основе нечеткой логики для проверки гипотез;

3) метод на основе спектральной интерференции непригоден для анализа всей сетки частот вследствие высокой неопределенности при принятии решений.

На базе описанных выше факторов авторами разработан алгоритм уточнения частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков. Структурная схема предложенного алгоритма представлена на рисунке 2.

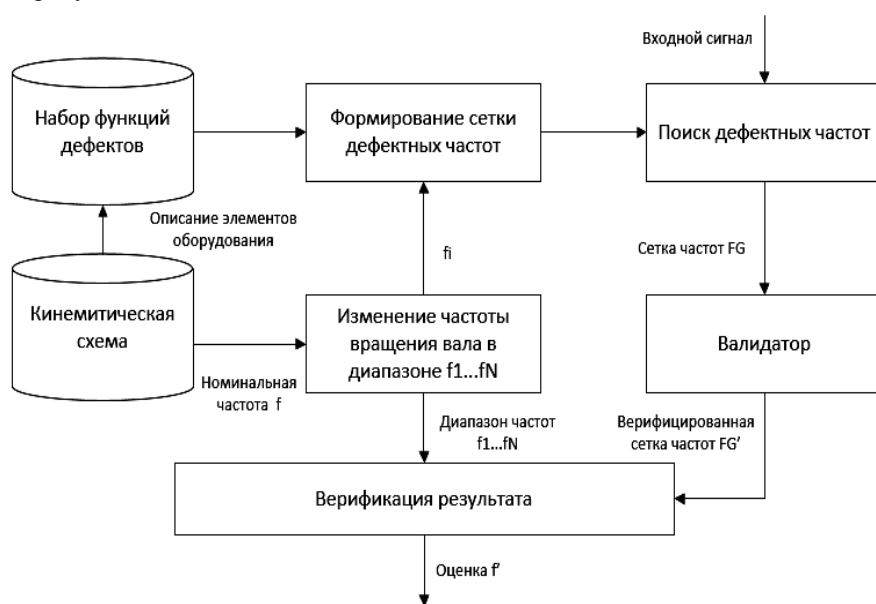


Рисунок 2. – Уточнение частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков

Валидатор – это алгоритм верификации сетки дефектных частот оборудования. Работа валидатора схожа с работой эксперта по вибродиагностике, сопоставляющего найденные спектральные составляющие с возможными дефектными частотами элементов оборудования.

Алгоритм уточнения частоты на основе валидатора информативных признаков базируется на следующем предположении. При наличии исчерпывающей кинематической схемы оборудования и полной корректно сформированной сетки частот (информативных признаков) действительному значению частоты вращения первичного вала будет соответствовать максимальное количество валидных дефектных частот. Под валидными понимаются дефектные частоты, которые хорошо согласуются с шаблоном дефекта, имеют достаточную выраженность, рядность и т.д. Описанные правила реализованы на основе нечеткой логики (fuzzy logic). Формируется три набора дефектных частот для обработки (по трем порогам выраженности в логарифмическом представлении).

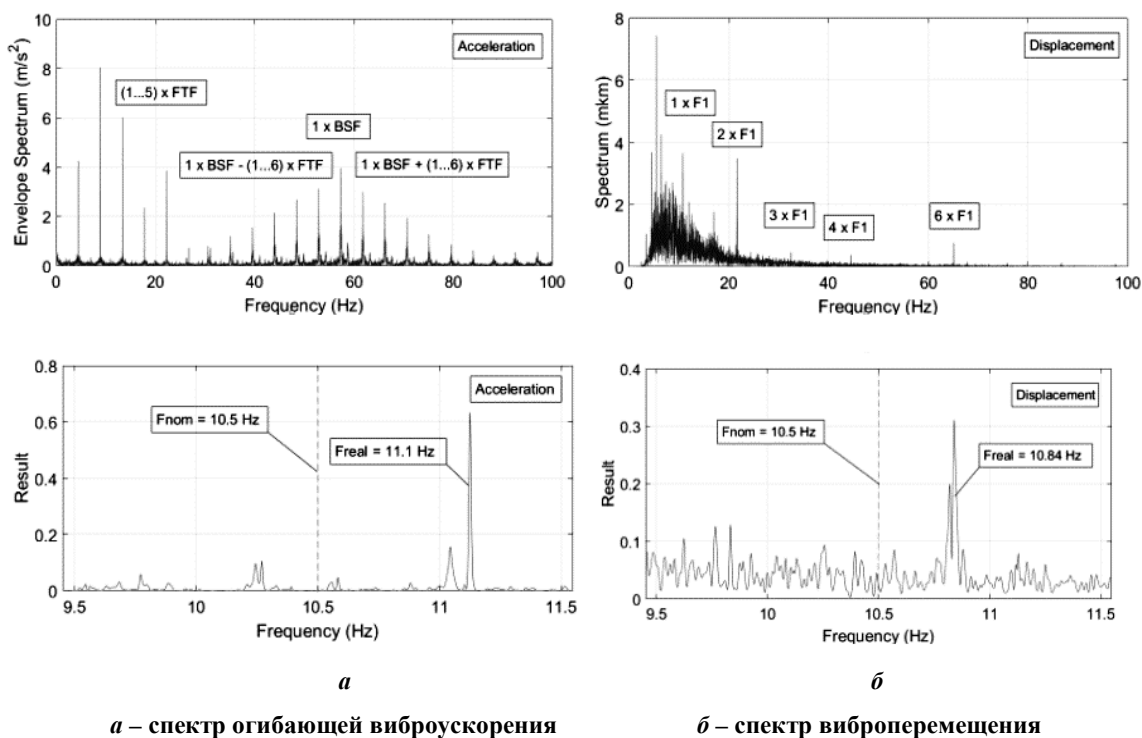
Полученные зависимости количества валидных дефектных частот от значения частоты вращения первичного вала для трех уровней выраженности $C_k(f_i)$ нормируют по амплитуде и перемножают.

$$SI(f_i) = \prod_{k=1}^3 \bar{C}_k(f_i), \quad (8)$$

где $\bar{C}_k(f_i)$ – нормированная зависимость количества валидных дефектных частот от частоты вращения первичного вала f_i для k -го уровня выраженности дефектных частот.

Результат работы валидатора $SI(f_i)$ во многих случаях может иметь вид набора пиков одинаковой высоты или даже целых плато, что не позволяет осуществить уточнение. Для решения данной проблемы применяется процедура верификации результата. Она заключается в выборе нескольких уникальных наборов дефектных частот, которые имеют представителей с высокой выраженностью, последующей спектральной интерференцией. В результате подобной процедуры в качестве результата получается один или два пика, превосходящих остальные на несколько порядков.

На рисунке 3 представлен пример неопределенности при уточнении частоты методом спектральной интерференции. Случай соответствует пункту 3, когда уточнение в обоих спектрах дает различные результаты. Сигнал получен с акселерометра, установленного на подшипнике качения 6213 со сколами на телах качения. Номинальная частота вращения первичного вала $F1_{nom} = 10,5$ Гц, длительность записи $T = 30$ с, частота дискретизации $Fs = 96$ кГц.



a – спектр огибающей виброускорения

b – спектр виброперемещения

Рисунок 3. – Уточнение частоты на основе спектральной интерференции

В спектре огибающей виброускорения отсутствуют валовые компоненты $n \cdot F1$, вместо них присутствуют составляющие $n \cdot FTF$ и $BSF + m \cdot FTF$, где $n = 1..5$, $m = -6..6$, $FTF = 4,45$ Гц, $BSF = 57,35$ Гц.

Данный шаблон указывает на наличие сколов, трещин на телах качения. Значения уточненных частот в спектре виброперемещения $F1_{real}' = 10,84$ Гц (рисунок 3, а) и в спектре огибающей виброускорения $F1_{real}'' = 11,1$ Гц (рисунок 3, б) разнесены на $\Delta = 2,48\%$ относительно номинальной частоты, что порождает неопределенность при принятии решений. Для устранения неопределенности используется метод на основе валидатора информативных признаков, результат работы которого приведен на рисунке 4.

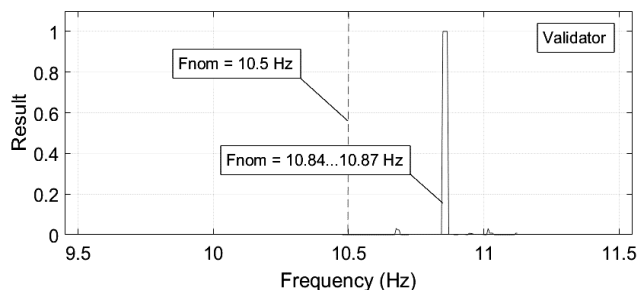


Рисунок 4. – Результаты уточнения частоты на основе валидатора информативных признаков

Метод на основе валидатора указал возможный диапазон частоты первичного вала: $F1_{real}'''$ составляет 10,84...10,87 Гц. Таким образом, по мажоритарному принципу в качестве действительной частоты выбирается результат, полученный в спектре виброперемещения ($F1_{real} = 10,84$ Гц).

Следует отметить, что результат уточнения на основе валидатора информативных признаков в виде диапазона частот объясняется изменением значений основных дефектных частот элементов оборудования под влиянием внешних факторов (температуры, нагрузки и т.д.) [5] и/или некорректно составленной кинематической схемой оборудования.

Результаты и их обсуждение. Ни один из представленных в работе алгоритмов не является самодостаточным и универсальным. Основной недостаток метода уточнения частоты вращения вала на основе спектральной интерференции – сильная зависимость от наличия в спектрах выраженных валовых компонент. При прецизионной балансировке вала или же удаленности точки съема от источника вибрации уточнение может быть некорректным. Однако данный метод обладает наибольшей точностью и малым уровнем грубых ошибок.

В свою очередь, метод на основе валидатора информативных признаков не обладает достаточной точностью, так как указывает лишь диапазон возможных значений частоты первичного вала. Кроме того, данный метод сильно зависит от корректности формирования сетки частот, изменения геометрических размеров элементов оборудования под воздействием внешних факторов, а также от наличия выраженных спектральных компонент. Поэтому авторами предложено использовать данный метод только в модуле принятия решений для разрешения возникающих неопределенностей. Итоговая структурная схема алгоритма уточнения частоты представлена на рисунке 5.



Рисунок 5. – Структурная схема алгоритма уточнения частоты

Для оценки точности и стабильности работы предложенных алгоритмов использовался набор вибро-сигналов, снятых с оборудования с различной степенью выраженности дефектов. Частота дискретизации сигналов $F_s = 96$ кГц (220 кГц). Предварительно частота вращения первичного вала для каждого сигнала определялась экспериментально или указывалась невозможность уточнения.

Сравнивается 4 различных алгоритма:

- *SI* (спектральная интерференция без верификации кадров);
- *SIV* (спектральная интерференция с верификацией кадров);
- *SIV+VAL* (спектральная интерференция с верификацией кадров и валидатор без верификации результатов);
- *SIV+VALV* (спектральная интерференция с верификацией кадров и валидатор с верификацией результатов).

Результаты работы алгоритмов сравниваются в терминах 1) процент грубых ошибок (gross error – *GE*) и 2) процент корректного уточнения (correct refinement – *CR*).

Процент грубых ошибок вычисляется как

$$GE(\%) = \frac{N_{ge}}{N_a} \cdot 100, \quad (9)$$

где N_{ge} – число сигналов с отклонением полученной оценки более чем на $\pm 2\%$ от значения, установленного экспериментально; N_a – общее количество сигналов, для которых уточнение частоты возможно.

Процент корректного уточнения вычисляется как

$$CR(\%) = \left(\frac{N_r}{N_{re}} + \frac{N_{nr}}{N_{rd}} \right) \cdot 100, \quad (10)$$

где N_r – число сигналов с корректно осуществленным уточнением; N_{re} – число сигналов, где возможно экспертное уточнение частоты; N_{nr} – число сигналов, где уточнение не было проведено из-за высокой неопределенности; N_{rd} – число сигналов, где невозможно экспериментальное уточнение частоты.

Проверка проводилась для 2-х типов сигналов:

- 1) с хорошо выраженными дефектными частотами (превышают более чем на 3 дБ уровень шума);
- 2) со слабо выраженными дефектными частотами.

В таблице 1 представлены результаты тестирования представленных в статье алгоритмов.

Таблица 1. – Сравнение алгоритмов уточнения частоты вращения вала

Метод	Хорошо выраженные дефектные частоты		Слабо выраженные дефектные частоты	
	GE	CR	GE	CR
SI	0,8	72,5	0,5	43,1
SIV	0,6	77,1	0,5	68,5
SIV+VAL	0,6	78,3	0,5	70,3
SIV+VALV	0,2	89,1	0,4	75,8

Работа алгоритма *SIV+VALV* на сигналах с хорошо выраженными дефектными частотами показывает точность, близкую к работе эксперта. Процент грубых ошибок в основном связан с эффектом размытия спектра при изменении режимов работы. Применение метода *VAL* без верификации результата лишь незначительно улучшает работу, а в некоторых может приводить к неверному уточнению. Однако, как показано в таблице 1, совместное использование методов на основе *SIV+VALV* демонстрирует наименьший процент грубых ошибок (0,2 и 0,4%) и наилучший процент корректной работы (89,1 и 75,8%) для сигналов с хорошо и слабо выраженными дефектными частотами.

Заключение. В работе предложены алгоритмы уточнения частоты вращения вала для задач вибродиагностики роторного оборудования. Данные алгоритмы позволяют повысить точность работы автоматических систем вибродиагностики в частотной области. Показано, что наилучшие точность и стабильность достигается при совместном использовании алгоритмов уточнения частоты на основе спектральной интерференции и на основе валидатора информативных признаков, имеющих процент корректной работы 89,1 и 75,8% для сигналов с хорошо выраженными и слабо выраженными дефектными

частотами соответственно. Эксперименты на реальных сигналах показали, что предложенные алгоритмы применимы в задачах автоматической вибрационной диагностики. Дальнейшие исследования предполагается направить на повышение эффективности и стабильности работы описанных в статье алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования : учеб. пособие / И.Л. Абрамов. – Кемерово, 2011. – 80 с.
2. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
3. Баркова, Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частей вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза : учеб. пособие / Н.А. Баркова, А.А. Борисов. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
4. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
5. Mbo'o, C. Impact of the load in the detection of bearing faults by using the stator current in PMSM's / C. Mbo'o, T. Herold and K. Hameyer // XXIth International Conference on Electrical Machines, 2–5 September 2014 / Institute of Electrical Machines RWTH Aachen University, Germany, 2014. – P. 1615–1621.

Поступила 15.08.2017

ALGORITHMS FOR REFINEMENT OF THE SHAFT ROTATIONAL SPEED IN PROBLEMS OF VIBRATION-BASE DIAGNOSTICS OF ROTARY EQUIPMENT

Y. ASLAMOV, A. ASLAMOV, I. DAVYDOV, A. TSURKO

Automatic systems of vibration-based diagnostics allow to solve problems of estimation of a technical condition of rotary equipment without involvement of experts. However, informative features of defects in the frequency domain strongly depend on the rotational speed of the equipment shafts, which can lead to incorrect operation of diagnostic systems. To improve the stability and accuracy of automatic vibration-based diagnostics in the frequency domain, algorithms for refinement of the shaft rotational speed without using additional devices are proposed.

Keywords: *vibration-based diagnostics, digital signal processing, frequency domain, frequency refinement.*

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 656.135

УПРАВЛЕНИЕ ВЪЕЗДОМ ПОТОКОВ АВТОМОБИЛЕЙ НА СКОРОСТНЫЕ ДОРОГИ ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ

*канд. техн. наук, доц. Р.Ю. ЛАГЕРЕВ**(Иркутский государственный технический университет);**д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА**(Полоцкий государственный университет)*

Установлена вероятность образования транспортного затора от объема рамповых примыкающих потоков к скоростной дороге. В зоне слияния потоков часть транспортных средств, движущихся по магистрали, занимают одновременно две полосы движения, снижая пропускную способность базовых сегментов автомагистрали. Представлены методология, принципы и стадии управления доступом к дорогам высших категорий, направленные на повышение эффективности их функционирования. Предложена методика, позволяющая оценить и оптимизировать управление въезжающими на автомагистраль потоками с позиции минимизации суммарных длин очередей транспортных средств, возникающих на примыкающих въездах за счет внедрения адаптивных систем управления транспортным спросом.

Ключевые слова: рекуррентные транспортные заторы, управление доступом к сети, пропускная способность магистралей, управление магистральными рампами, управление транспортным спросом.

Введение. Проектирование скоростных дорог высших категорий предполагает обеспечение обеспеченного и безопасного движения транспортного потока. Это требует развития методов управления дорожным движением с применением адаптивного регулирования и автоматического мониторинга характеристик движения транспортных потоков [1]. Плотный неуправляемый рамповый поток в зоне его взаимодействия с потоком на магистральной дороге приводит к образованию «турбулентности» по причине необходимости перестроения транспортных средств с одной полосы на другую с последующим снижением скорости потока на главном направлении. Существующие подходы к применению адаптивного регулирования реализуют, главным образом, на пересечениях в одном уровне для условий свободного равномерного движения. Отмечается [1], что эффективность «классического» адаптивного регулирования резко снижается в случае функционирования связанных регулируемых пересечений в условиях насыщения и перенасыщения. Уровень обслуживания транспортных потоков на дорогах высших категорий сводится к оценке значений плотности движения на сегментах магистральной сети [2–4].

С тем чтобы создать необходимые методы управления потоками, возникла задача оценки вероятности образования рекуррентных транспортных заторов на дорогах высших категорий с учетом имеющейся информации о транспортном спросе.

Методы исследования. Задачу прогнозирования транспортных заторов решали с применением программных продуктов микро моделирования транспортных потоков, теории вероятности и массового обслуживания. Магистральная дорога в рассматриваемом случае представлена двумя полосами движения 1 и 2 с примыкающей рампой 0 (рисунок 1). По условиям моделирования рассматривается ситуация, при которой въезд на магистральную дорогу не ограничен и организован по принципу поиска приемлемых разрывов в основном потоке 1 и 2.



0 – полоса движения по рампе; 1 и 2 – полосы движения по магистральной дороге

Рисунок 1. – Схема образования затора в зоне слияния потоков

Основная часть. Анализ видеоматериалов в зоне слияния транспортных потоков позволил установить пределы и условия развития их «турбулентности» (рисунок 2). Мощность транспортного потока на рампе определяет поведение участников движения на крайней правой полосе 1. При увеличении потока на рампе, составляющей 15...25% от интенсивности движения магистрального потока, отмечается начало распространения «турбулентности» на расстояние 50...300 м от начала взаимодействия потоков. При интенсивности рампового потока, превышающей 26% магистрального потока, «турбулентность» потока частично захватывает левую крайнюю полосу движения 2, способствуя значительному снижению пропускной способности полосы движения и в целом всего транспортного коридора.

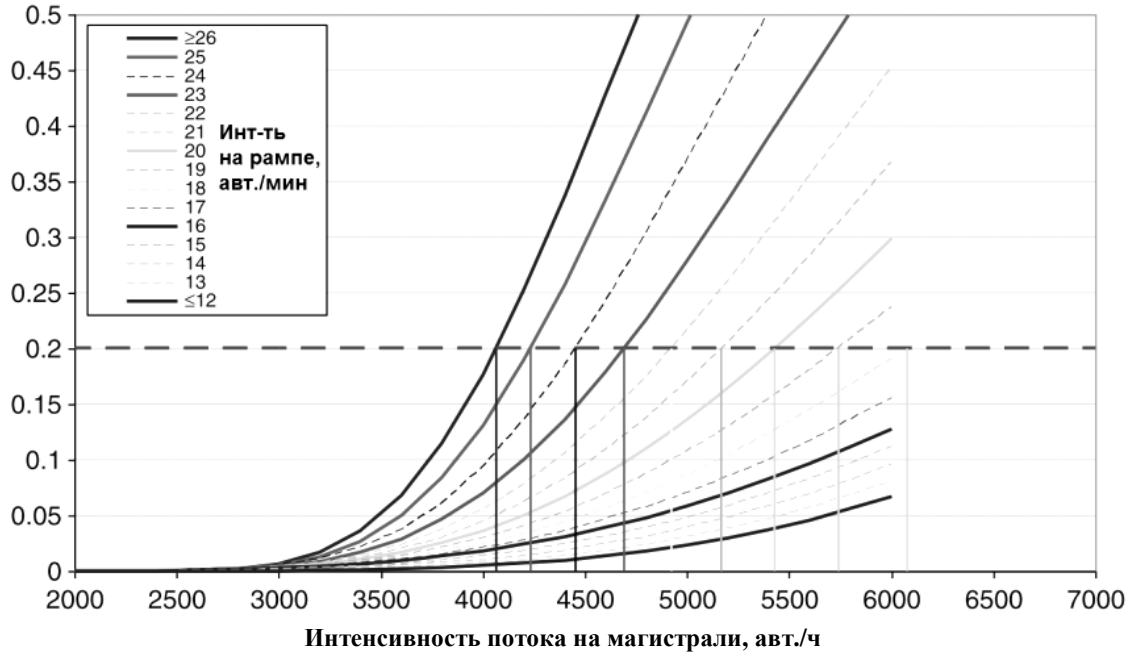


Рисунок 2. – Зависимость вероятности транспортных заторов от интенсивности потоков на магистрали и рампе

Отказ системы определяется вероятностью начала образования очередей транспортных средств на магистрали перед зоной слияния потоков. Например, при магистральном потоке 5000 авт./ч и потоке 1380 авт./ч на примыкающей рампе вероятность образования затора оценивается в 29%. Принято граничное значение вероятности отказа системы 20%, что требует необходимости снижения потока на примыкающей рампе. Реализовать это условие возможно с применением управления доступом к магистрали [5].

В качестве альтернативного варианта прогнозирования образования очереди в качестве критерия устойчивости системы предлагается использовать функцию продолжительности жизненного цикла

$$F(t) = 1 - S(t), \quad (1)$$

где $F(t) = p(T \leq t)$ – функция распределения «устойчивого» состояния системы обслуживания; T – продолжительность устойчивого состояния системы обслуживания; $S(t) = p(T > t)$ функция надежности системы обслуживания.

Оценочная функция предела устойчивости системы обслуживания $\hat{S}(t)$ определялась как

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j < t} \frac{n_j - \delta_j}{n_j}, \quad (2)$$

где n_j – количество позиций с условием $T \geq t_j$; δ_j – количество отказов в системе за время t_j .

Предлагается уравнение (1) рассматривать как функцию распределения вероятности устойчивости магистрали к затору в следующем виде:

$$F(q) = p(q_i \leq q) = 1 - p(q_i > q), \quad (3)$$

где $F(q)$ – распределение вероятности образования затора; q – фактическая интенсивность движения транспортного потока по полосе; q_i – величина транспортного потока в интервале i , способствующая снижению скорости; $p(q_i > q)$ – вероятность превышения критического потока над фактическим.

Зависимость (2) можно представить в виде задачи максимума правдоподобия

$$\hat{p}(q_i > q) = \hat{S}(q) = \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B, \tag{4}$$

где k_i – количество интервалов измерений с условием $q \geq q_i$; d_i – количество нарушений в системе обслуживания потоков q_j ; B – наборы интервалов с отказами $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$.

При условии принятия дискретного влияния измеряемых величин потоков на работу системы (одно нарушение d_i на фактический интервальный поток q_i), уравнение (4) можно записать в следующем виде

$$F(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - 1}{k_i}, \quad i \in B. \tag{5}$$

Оценка вероятности образования динамического удара в потоке (б) (в зарубежной литературе *breakdown flow*) выполнена на примере участка улично-дорожной сети в виде транспортной развязки на мосту, результаты которой представлены на рисунке 3.

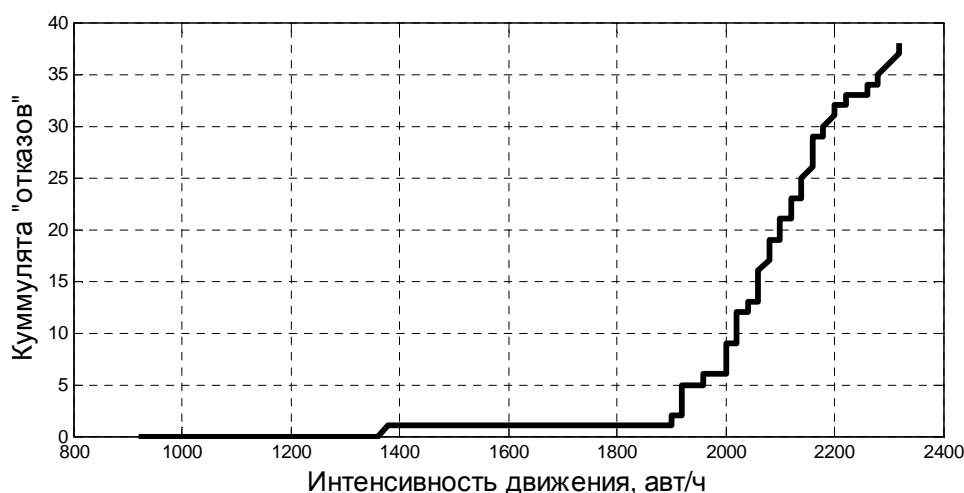


Рисунок 3. – Анализ «отказов» системы на подходе к мосту

Наибольшее количество отказов в системе (15%) было отмечено в условиях насыщения участка слияния (см. рисунок 1). Начиная со значений интенсивности 1980 авт./ч, отказы в системе фиксировались с частотой 3/5 (3 отказа на каждые 5 наблюдаемых интервалов).

Модель продолжительности жизненного цикла процесса может быть принята в качестве первого приближения для оценки прогнозирования транспортных заторов и управления скоростными дорогами. Вместе с тем обеспечение обособленного скоростного движения на магистральных дорогах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет снижения вероятности транспортных заторов с применением средств активного управления транспортным.

Адаптивные методы управления доступом к магистрали [6] позволяют повысить безопасность слияния транспортных потоков, увеличить пропускную способность автомагистралей, снизить расход топлива и выбросы токсичных веществ в выхлопных газах автомобилей. Регламентирование въезда на автомагистраль рассматривается как наиболее эффективный инструмент обеспечения нормативных скоростей движения на дорогах высших категорий и требуемой безопасности взаимодействия потоков в зонах их слияния. Например, американское Руководство по пропускной способности автомобильных дорог посредством технического регулирования дорожного движения *MUTCD* отмечает особенности применения средств светофорного дозирования потоков на рамповых развязках, которые сводятся к следующему:

- значительное снижение задержек транспортных средств, движущихся по магистрали путем их «перекладывания» на рамповые потоки;
- обеспечение дополнительного пространства для транспортных средств, скапливающихся на подходе к автомагистрали;
- наличие альтернативных путей проезда с соответствующей пропускной способностью для обслуживания транспортных потоков вне магистрали.

Таким образом, основной принцип управления доступом к сети выражается в регулировании транспортного спроса на магистралях, основанного на некотором алгоритме, входными параметрами

которого являются: значения транспортного спроса на сегментах автомагистрали; скорости свободного движения, уровень загрузки зоны слияния потоков. Максимальная практическая пропускная способность рамповой полосы составляет 900 авт./ч с минимумом 240 авт./ч.

При разработке алгоритма управления доступом к магистрали в качестве механизма повышения эффективности ее функционирования применяли согласование характеристик прибытия и убытия транспортных средств с рампового подхода. При этом «система дозирования» рампового потока должна гарантировать эффективность работы всех сегментов магистрали, из которых она состоит (см. рисунок 2).

Алгоритм управления транспортным спросом может быть сведен к решению следующей прикладной задачи. Магистраль разбивается на несколько j -тых сегментов, в каждом из которых имеется хотя бы одна питающая рампа. Величина магистрального потока задается зависимостью

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i, \quad \alpha_{ij} \in [0, 1], \quad (6)$$

где q_j – транспортный поток на j -той магистральной секции, авт./ч; s_i – вливающийся поток с i -той рампы, авт./ч; α_{ij} – доля i -того рампового потока проходящего по j -той магистральной секции.

Дозирующий рамповый поток ограничивается условием

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\}, \quad (7)$$

где d_i – транспортный спрос на i -той рампе; $s_{i,\max}$ – пропускная способность i -той рампы.

Решение указанной задачи реализовано в виде m -файла для модуля программного комплекса Optimization Toolbox пакета Matlab R2013 в следующей постановке:

$$\min \left(\frac{1}{2} x' H x + f' x \right)$$

- при односторонних ограничениях

$$A x \leq b,$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq};$$

- при двухсторонних ограничениях

$$lb \leq x \leq ub,$$

где x – вектор оцениваемых параметров, $m \times 1$, $x \geq 0$; H – матрица Гессе, $m \times m$; f – вектор коэффициентов целевой функции $m \times 1$; A – матрица коэффициентов ограничений-неравенств, $n \times m$; A_{eq} – матрица коэффициентов линейных ограничений-равенств, $n \times m$; b – вектор правых частей ограничений-неравенств, $n \times 1$, $b \geq 0$; b_{eq} – вектор правых частей линейных ограничений-равенств $n \times 1$; lb – вектор нижних ограничений параметров $m \times 1$, $lb \geq 0$; ub – вектор верхних ограничений $m \times 1$, $ub \geq 0$.

Матрица Гессе является симметричной и положительно определенной, элементы которой h_{ij} равны второй частной производной, соответственно целевая функция должна быть выпуклой и дифференцируемой. В рассматриваемой задаче управления доступом целевая функция является суммой квадратов остатков значений очередей транспортных средств, следовательно, функция дифференцируема и положительно определена:

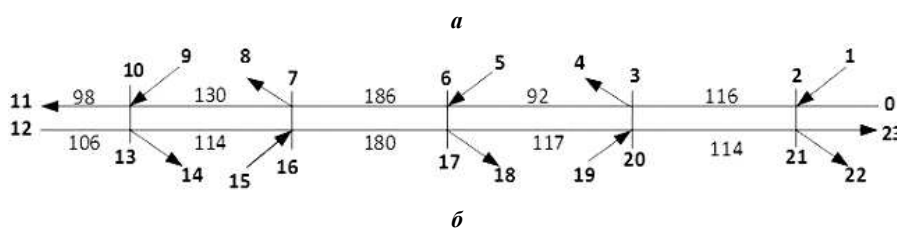
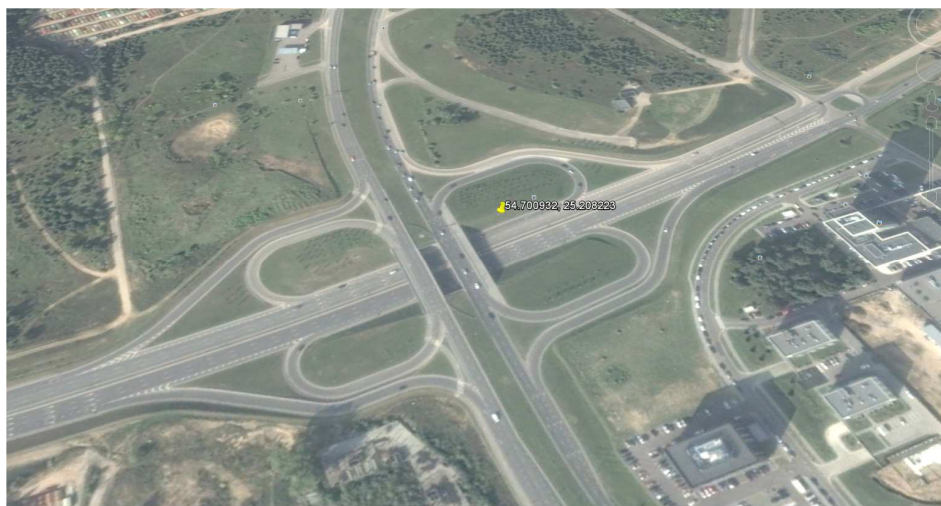
$$H(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В качестве основного управляющего параметра выбраны значения «объемов дозирования» транспортных потоков с примыкающих рамп при выполнении следующих условий:

- не допустить перегрузки сегментов магистрали;
- максимально сократить суммарную длину очереди на примыкающих рампах.

При наличии объективной информации об условиях движения транспортного потока на каждом из сегментов магистрали (интенсивность/плотность) предлагаемый алгоритм позволяет оценить вероятности

начала образования затора по значениям рампового потока, основываясь на критерии «плотность транспортных средств на полосу движения». Для каждого магистрального сегмента представлены граничные значения величин плотности движения, при которых условия движения магистрального потока могут рассматриваться как наихудшие, способствующие высокой вероятности образования затора. Апробация предлагаемого алгоритма управления доступом к сети выполнялась на примере транспортного узла (рисунок 4). Целью эксперимента являлась оценка максимально-возможных 15-минутных рамповых потоков (потоков насыщения), обслуживаемых рассматриваемым участком дорожной сети с позиции недопущения перегрузки базовых сегментов магистрали и роста длин очередей транспортных средств на примыкающих рампах.



a – общий вид; *б* – представление в виде ориентированного графа; 0–11, 12–23 – основные направления транспортных потоков

Рисунок 4. – Анализируемый транспортный узел

Моделирование загрузки автомагистрали выполнялось с целью прогнозирования нагрузки на восемь сегментов автомагистрали по следующим трем сценариям:

- 1) при существующем распределении транспортных потоков без ограничения доступа к сети;
- 2) с ограничением доступа к сети по принципу одно транспортное средство за светофорный цикл;
- 3) с ограничением доступа к сети по принципу несколько транспортных средств за светофорный цикл.

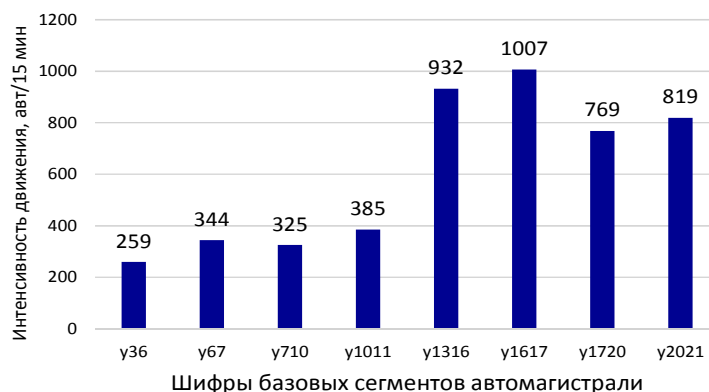
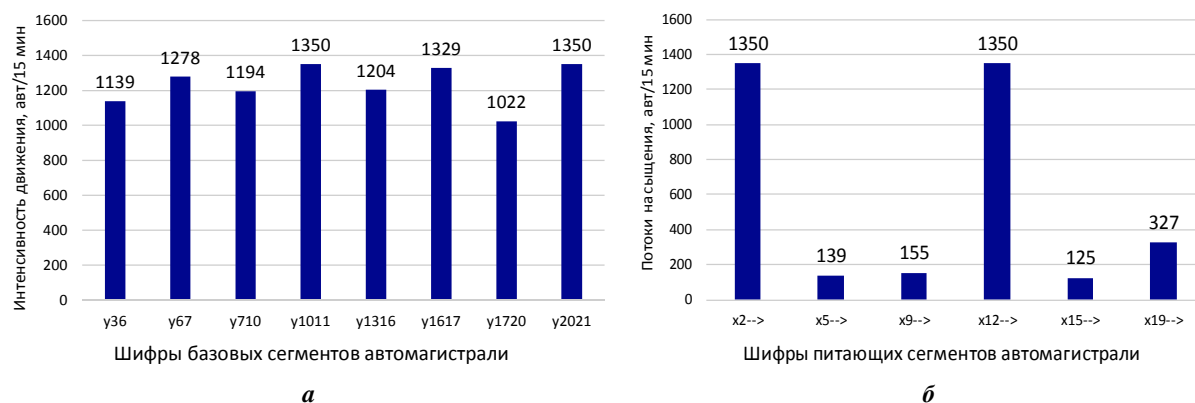


Рисунок 5. – Оценка нагрузки на сегменты автомагистрали при существующем транспортном спросе

На первом этапе моделирования получены оценки значений нагрузки на элементы автомагистрали при существующем транспортном спросе, подтверждающие отсутствие участков перенасыщения (рисунок 5); на втором – оценки нагрузки на сегменты автомагистрали (рисунок 6, а) от максимально возможных значений рамповых потоков (рисунок 6, б) при условии, что ограничения на въезд не предусматриваются; на третьем – оценки нагрузки на сегменты автомагистрали (рисунок 7, а) от значений рамповых потоков (рисунок 7, б) при внедрении системы дозирования транспортными потоками на примыкающих (питающих магистраль) рампах.



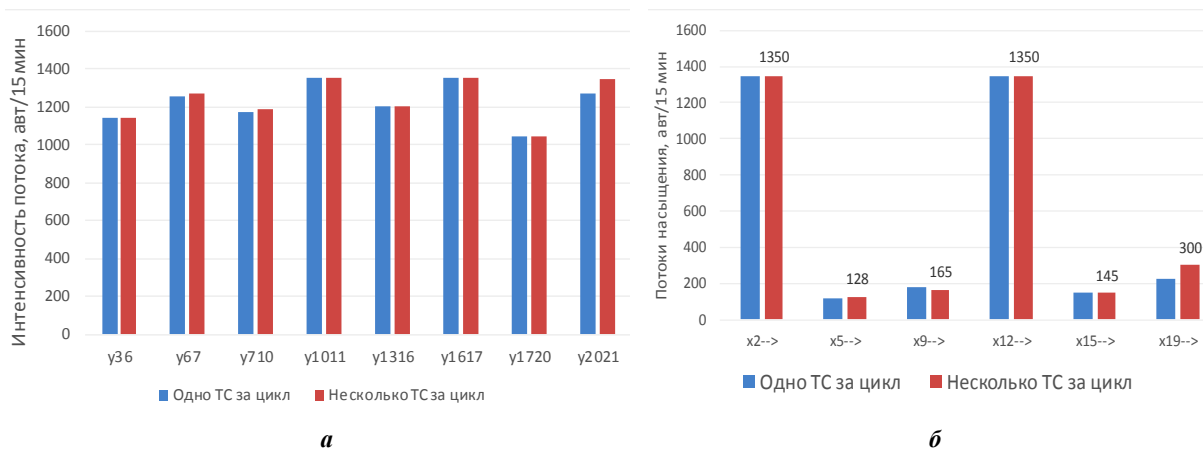
а – нагрузка на сегменты автомагистрали; **б** – рамповые потоки насыщения

Рисунок 6. – Максимальные потоки насыщения и соответствующие им нагрузки на сегменты автомагистрали без ограничения доступа к сети

Очевидно преимущество предлагаемой модели – матрица A имеет размерность $n > m$ – полный ранг, следовательно, задача имеет единственной локальный минимум, совпадающий с глобальным. Следует также отметить влияние на плотность (интенсивность) движения верхнего ограничения, характеризующего пропускную способность примыкающих рамп. Указанное ограничение может использоваться как эффективный инструмент управления дорогами высших категорий, с позиции применения зависимости

$$s_{in} = \frac{c_i C_i}{g_i}, \quad (9)$$

где s_{in} – поток насыщения i -той рампы, авт./ч; C_i – длительности цикла регулирования на i -той рампе, с; g_i – длительность такта рамповой полосы, с.



а – нагрузка на сегменты автомагистрали; **б** – рамповые потоки насыщения

Рисунок 7. – Потоки насыщения и соответствующие им нагрузки на сегменты автомагистрали при ограничении доступа

Кроме этого, с учетом представленных выше результатов моделирования можно принять практические рекомендации, представленные в руководстве НСМ 2010, на основании которых учитывать в системе дозирования потоков одно или несколько транспортных средств за такт g_i .

Заключение. Принимая во внимание качество исходных данных и их существенное влияние на параметры управления магистралью, важно обладать точной информацией о распределении транспортных потоков внутри транспортного коридора.

Как показали результаты тестирования, значительное влияние на качество управляющего воздействия оказывают:

- фактические значения пропускной способности сегментов магистрали;
- матрица, характеризующая распределение питающих потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход), получить которую можно расчетом существующей матрицы корреспонденций рамповых потоков, регистрацией номеров транспортных средств.

В этой связи необходимо в дальнейшем разработать:

- методику оценки пропускной способности для сегментов магистрали с учетом возможных условий взаимодействия транспортных потоков (перестроение, разветвление, слияние);
- методику оценки матриц корреспонденций рамповых потоков с учетом используемых методов фиксации разрывов в потоке на алгоритме генетической оптимизации, являющемся наиболее устойчивым к возможным ошибкам в исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей / А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Новосибирск : Наука, 2004. – 266 с.
2. Lorenz, M. A probabilistic approach to defining capacity and breakdown, Transportation Research Circular E-C018 / M. Lorenz, L. Elefteriadou // Proceedings of the 4th international symposium on highway capacity, 27 June – 1 July 2000. – P. 84–95.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://news.kremlin.ru/news/46754>.
4. Лагереv, Р.Ю. К вопросу управления транспортными потоками в условиях плотного городского движения / Р.Ю. Лагереv, С.Ю. Лагереv, И.Г. Карпов // Вестник ИрГТУ. – Иркутск, 2012. – № 9 (68). – С. 139–145.
5. Lorenz, M. A probabilistic approach to defining capacity and breakdown, Transportation Research Circular E-C018 / M. Lorenz, L. Elefteriadou // Proceedings of the 4th international symposium on highway capacity, 27 June–1 July 2000, P. 84–95.
6. Transportation Research Board, National Academies (2010) Highway capacity manual 2010. Transportation Research Board, National Academies, Washington, DC.

Поступила 04.08.2017

MANAGEMENT OF THE ENTRY FLOW OF CARS ON HIGH-SPEED ROADS OF THE HIGHEST CATEGORY

R. LAGEREV, D. KAPSKI, V. IVANOV, T. VIGERINA

The probability of formation of traffic congestion from the volume ramp flows adjacent to the highway is set. In the confluence area of streams of the vehicles moving along the highway is two lanes, reducing the throughput of the basic segments of the motorway. The methodology, principles and stages of managing access to roads of higher categories, aimed at improving the efficiency of their operation are given. The proposed method allows to estimate and optimize the management of driving on the motorway flows with positions to minimize the total lengths of the queues of vehicles that occurs on the adjacent entrances through the introduction of adaptive control systems of transport demand.

Keywords: recurrent congestion, intelligent transportation systems, access management, ramp control management, transport demand management.

УДК 656.13:625

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБУСТРОЙСТВО И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СВЕТОФОРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ

канд. техн. наук, доц. Е.Н. КОТ; д-р техн. наук, проф. В.К. ЯРОШЕВИЧ

(Белорусский национальный технический университет, Минск);

д-р техн. наук, проф. А.К. ГОЛОВНИЧ

(Белорусский государственный университет транспорта, Минск);

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрено влияние инженерного обустройства, в том числе техническими средствами организации дорожного движения, и режимов работы светофорных объектов, расположенных на пешеходных переходах вне перекрестков, на безопасность и условия дорожного движения на примере города Минска. Выполненный анализ позволил сформировать комплекс мер по повышению безопасности дорожного движения на регулируемых пешеходных переходах, который повысит не только безопасность, но и совокупное качество дорожного движения в местах расположения таких переходов. Рекомендации носят системный характер и имеют целенаправленную ориентацию на совершенствование организации дорожного движения в Республике Беларусь.

Ключевые слова: *дорожное движение, пешеходные переходы, инженерное обустройство, светофорные объекты, режимы работы.*

Пешеходные переходы разделяют на наземные и внеуличные. В свою очередь, наземные пешеходные переходы делятся на регулируемые и нерегулируемые; внеуличные – на подземные и надземные [1; 2]. Известна также более широкая система деления пешеходных переходов по наличию и отсутствию определенных признаков, к примеру: по наличию и виду островка безопасности, виду обустройства техническими средствами организации дорожного движения (ТСОДД) и пр. [2; 3].

В Республике Беларусь в настоящее время светофорные объекты (СФО) на регулируемых переходах (РПП) вне перекрестков составляют около 25% от всех светофорных объектов. Данные по некоторым городам представлены в таблице 1 [4–13].

Таблица 1. – Светофорные объекты в городах Беларуси

Город	СФО на перекрестках	СФО на РПП	Всего СФО	Доля РПП
Скидель	1	1	2	0,50
Щучин	1	1	2	0,50
Б. Берестовица	1	1	2	0,50
Слоним	4	3	7	0,43
Мосты	2	1	3	0,33
Гродно	79	31	110	0,28
Лида	11	4	15	0,27
Полоцк	11	4	15	0,27
Минск	450	104	554	0,27
Витебск	45	14	59	0,24
Новополоцк	7	2	9	0,22
Пинск	32	9	41	0,22
Гомель	91	20	111	0,18
Молодечно	20	4	24	0,17
Волковыск	5	1	6	0,17
Новогрудок	6	1	7	0,14
Брест	52	8	60	0,13
Мозырь	13	2	15	0,13
Бобруйск	51	4	55	0,07
Сморгонь	3	0	3	0,00
Свислочь	1	0	1	0,00
Пограничный	1	0	1	0,00
Суммарно	789	234	1023	0,23
Беларусь	–	–	1326	≈ 0,25

Видно, что наибольшее количество светофорных объектов расположено в крупнейшем городе республики – Минске. В результате проведения натурных обследований улично-дорожной сети (УДС) города составлен перечень всех регулируемых пешеходных переходов вне перекрестков в Минске и выполнен анализ планировки, существующей организации дорожного движения на таких переходах.

По данным исследований проведена классификация переходов по ряду признаков, таких как:

- количество полос для движения автомобильного транспорта в обе стороны;
- наличие и вид островка безопасности (наличие разделительной полосы; островок выделен конструктивно, но не разделительной полосой; островок выделен разметкой; островок отсутствует);
- наличие вблизи перехода остановочного пункта маршрутного транспорта, формирующего значительную часть пешеходного потока, движущегося через исследуемый объект;
- вид разметки, обозначающей переход;
- прозрачность треугольника боковой видимости в конфликте «транспорт – пешеход»;
- количество ДТП, произошедших на данном объекте;
- наличие или отсутствие табло вызывного пешеходного (ТВП) и работа пешеходного вызывного устройства (ПВУ);
- вид светофорных устройств для транспорта;
- присутствие более чем одного дублирующего светофора для транспорта;
- наличие или отсутствие индикатора (таймера) обратного отсчета для транспортных или пешеходных светофоров;
- вид светофорных устройств для пешеходов;
- длительность светофорного цикла;
- длительность переходного интервала в конфликте «транспорт – пешеход».

В таблицах 2 и 3 приведены основные характеристики обустройства и режимов светофорного регулирования.

Таблица 2. – Данные по обустройству регулируемых пешеходных переходов вне перекрестков

Количество полос	Островок	ОП МТС	Разметка	Видимость	ДТП
2 полосы – 8	РП – 30	есть – 76	1.14.1 – 9	отл. – 62	нет – 72
4 полосы – 54	разметка – 22	нет – 47	1.14.2 – 5	хор. – 46	одно – 33
5 полос – 5	островок – 8	–	1.14.3 – 108	уд. – 10	два – 10
6 полосы – 32	нет – 63		красно-белая – 1	неуд. – 5	три – 5
7 полос – 5	–	–	–	–	четыре – 2
8 полос – 19				–	–

Таблица 3. – Данные по оснащению средствами регулирования и режимам работы светофоров на регулируемых пешеходных переходах вне перекрестков

ПВУ	Светофоры для транспорта	Светофоры для пешеходов	Цикл, с	Переходной интервал «пешеход-транспорт»
есть – 67	ламповые – 41	ламповые – 41	50 с – 1	5 с – 6
нет – 56	диодные – 51	диодные – 37	55 – 2	6 – 14
–	плоские – 31	плоские – 45	60 – 5	7 – 12
–	Дублеры	Таймер	64 – 1	8 – 32
–	есть – 21	есть – 33	65 – 1	9 – 20
–	нет – 102	нет – 90	66 – 2	10 – 14
–	Таймер	–	70 – 1	11 – 10
–	есть – 13	–	72 – 2	12 – 4
–	нет – 110	–	78 – 7	14 – 1
–	–	–	84 – 21	16 – 1
–	–	–	86 – 2	17 – 1
–	–	–	88 – 2	18 – 4
–	–	–	90 – 1	19 – 1
–	–	–	92 – 6	20 – 1
–	–	–	желтых миганий – 2	–

ОП МТС – остановочный пункт маршрутных транспортных средств.

Большинство регулируемых пешеходных переходов расположено на улицах с четырьмя полосами для движения транспорта (рисунок 1). К остановочным пунктам маршрутного пассажирского транспорта, формирующим большой пассажиропоток, тяготеют 62% регулируемых пешеходных переходов вне перекрестков, что проиллюстрировано данными, представленными на рисунке 2.

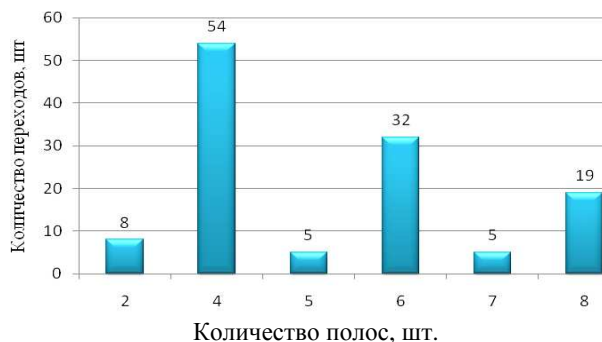
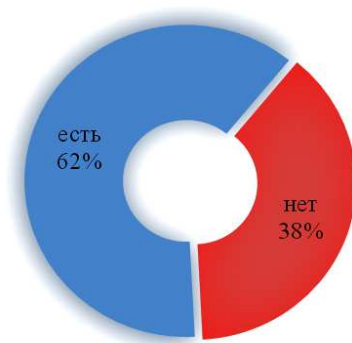
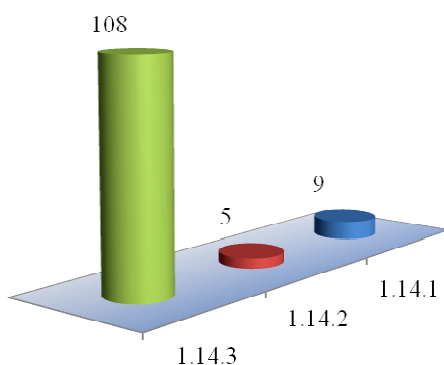


Рисунок 1. – Распределение переходов по числу полос для движения



**Рисунок 2. – Распределение переходов по наличию
вблизи остановочного пункта маршрутного пассажирского транспорта,
влияющего на формирование значительной части пешеходного потока**

Большинство пешеходных переходов оснащено стандартной разметкой 1.14.3 (рисунок 3), которая применяется для обозначения регулируемых пешеходных переходов по СТБ 1300. Однако данная разметка недостаточно различима в зимний и переходный периоды года. В связи с этим используются разметки 1.14.1 и 1.14.2, которые хорошо различимы водителями даже при наличии заснеженного покрытия на проезжей части.



**Рисунок 3. – Распределение переходов
по виду разметки, обозначающей переход**

Больше половины регулируемых пешеходных переходов вне перекрестков оборудованы пешеходным вызывным устройством (рисунок 4). Такое регулирование организовано из-за неравномерно форми-

рующихся в течение дня пешеходных потоков или только в вечернее и ночное время. В иных случаях применение вызывных устройств приводит к сбою координации вдоль всей магистрали, что сопровождается большими экономическими, экологическими, социальными и аварийными потерями. Причем при координированном регулировании пешеходы, идущие по пешеходному переходу перед экстренно тормозящими многорядными транспортными потоками, подвергаются повышенному риску, что подтверждается статистикой аварийности.

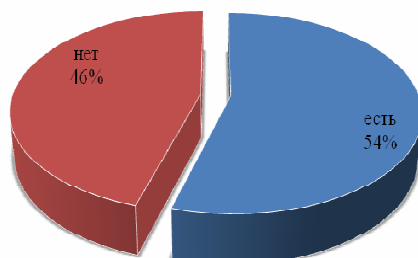


Рисунок 4. – Распределение переходов по наличию пешеходного вызывного устройства

На улицах Минска до сих пор установлено значительное количество светофорных объектов с ламповыми светосигнальными устройствами (рисунки 5, 6), которые периодически нуждаются в замене, поэтому их целесообразно заменять светофорами со светодиодными сигнальными устройствами.



Рисунок 5. – Распределение переходов по виду светосигнальных устройств светофоров для транспорта

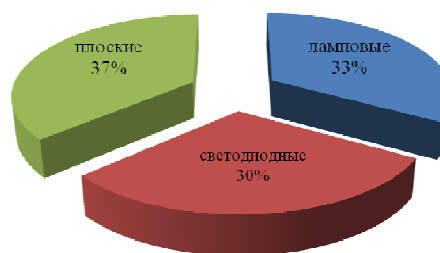


Рисунок 6. – Распределение переходов по виду светосигнальных устройств светофоров для пешеходов

Исследования показали, что на регулируемых пешеходных переходах использование таймера еще не получило большого распространения, в большей степени для транспорта (рис. 7). Следует отметить, что благодаря таймеру пешеходы в нужный момент могут определить смену дорожной обстановки. Особенно таймер необходим на широких улицах, когда пешеход, заметив запрещающий сигнал светофора, испытывает стресс.

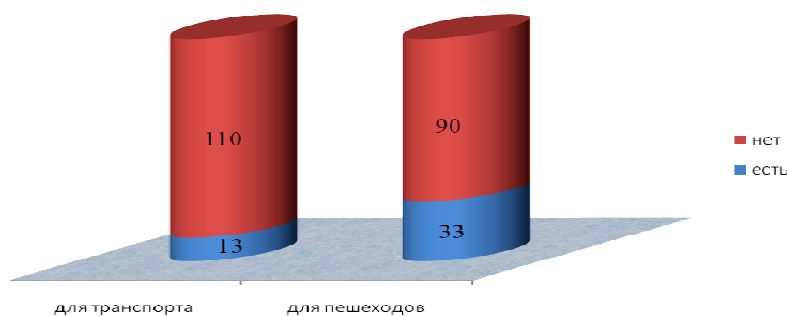


Рисунок 7. – Распределение переходов по наличию таймера

Большое количество регулируемых пешеходных переходов вне перекрестков являются системными объектами – включены в систему Автоматизированного управления дорожным движением горо-

да Минска (рисунок 8). Однако немалая часть пешеходных переходов вне перекрестков имеет недостаточную длительность переходного интервала «пешеход-транспорт» (рисунок 9).

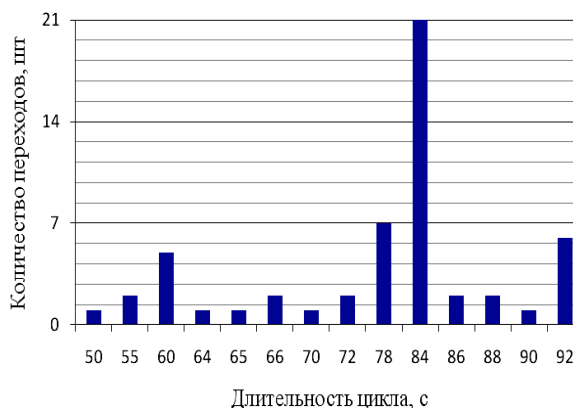


Рисунок 8. – Распределение переходов по длительности цикла на светофорных объектах без ПВУ

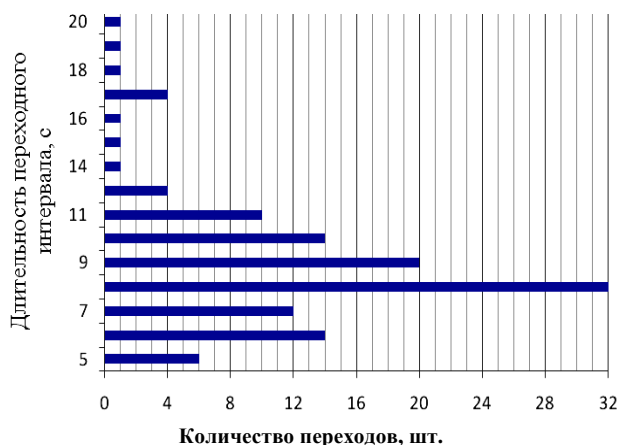


Рисунок 9. – Распределение переходов по длительности переходного интервала (пешеход – транспорт)

Безопасность движения пешеходов на регулируемом пешеходном переходе обеспечивается, в том числе, достаточной продолжительностью так называемого «переходного интервала», гарантирующего находящимся на пешеходном переходе при зеленом (немигающем) сигнале светофора безопасный переход всей проезжей части. Ранее, до 2003 года, переходной интервал не гарантировал безопасность перехода, поэтому Правила [14] в подобных ситуациях разрешали пешеходам останавливаться не только на островках безопасности, которых в Республике Беларусь организовано небольшое количество, но и на осевой линии разметки. Начиная с 2002 года согласно нормативу СТБ 1300 [15] введен полный переходной интервал, сопровождаемый продолжительным зеленым мигающим сигналом, гарантирующий безопасное завершение перехода, делая тем самым лишней остановку пешеходов на осевой линии. На этом основании в Правилах появился новый пункт, запрещающий остановку пешеходов на осевой линии и требующий обязательно, не останавливаясь, закончить переход.

Согласно проведенному анализу, за время, истекшее после введения в действие стандарта и Правил, только около 10% всех регулируемых пешеходных переходов обеспечивают достаточный переходной интервал, а остальные 90% не соответствуют СТБ 1300. Следовательно, запрещение на таких пешеходных переходах остановки на осевой линии и требование безостановочно закончить переход (при уже начавшемся движении транспорта) должно быть отменено. Опасность увеличивается еще и потому, что при координации автомобили движутся в многорядном потоке (в координированной пачке) с высокой скоростью и большинство водителей (при трехрядном движении – 2/3) физически не могут видеть пешехода, завершающего переход проезжей части уже при подаче разрешающего сигнала водителям автомобилей.

Выводы. Для решения проблем повышения безопасности дорожного движения на регулируемых пешеходных переходах вне перекрестков и на пешеходных переходах в целом необходимо решить ряд практических и научно-методических задач, среди которых следующие:

1. Разработка руководства по организации движения пешеходов с включением в его состав:
 - типового перечня пешеходных переходов для первоочередного сооружения островков безопасности (с определением видов и конструктивных особенностей островков);
 - типового перечня переходов, на которых островки безопасности выделяются только разметкой (в первую очередь и на перспективу);
 - рекомендаций по выбору видов пешеходных переходов и их оборудованию светофорным регулированием;
 - рекомендаций по применению современных технических средств организации дорожного движения на пешеходных переходах (светофоров, таймеров, ТВП, детекторов).
2. Разработка рекомендаций по выбору видов пешеходных переходов и их оборудованию светофорным регулированием.
3. Разработка рекомендаций по применению современных технических средств организации дорожного движения на пешеходных переходах.
4. Разработка методики исследования условий транспортно-пешеходного движения в зоне остановочных пунктов пассажирского маршрутного транспорта и типовых мероприятий по совершенствованию организации и повышению безопасности движения в зоне остановочных пунктов.
5. Разработка методик определения эффективности мероприятий по организации дорожного движения, критериев применения технических средств организации движения (спящих полицейских и иных искусственных неровностей, сочетания средств организации дорожного движения в зоне пешеходных переходов).
6. Разработка курса «Правила дорожного движения для пешеходов» для включения в программу средних школ.
7. Проведение пилотных (обучающих) занятий по курсу «Правила дорожного движения для пешеходов» в средних учебных заведениях.
8. Корректировка режимов светофорного регулирования на регулируемых переходах для обеспечения переходных интервалов для пешеходов (разработка документации, согласование, реализация).
9. Разработка (адаптация существующих) конструкций островков безопасности.
10. Внесение изменений, относящихся к размещению и обустройству пешеходных переходов и островков безопасности на них, в СНБ 3.03.02-97 «Улицы и дороги городов, поселков и сельских населенных пунктов».
11. Формирование детальной программы переоборудования пешеходных переходов в населенных пунктах городского типа Республики Беларусь (с указанием конкретных перекрестков и переходов).
12. Разработка проектно-сметной документации для переоборудования пешеходных переходов (в том числе устройства островков безопасности и их оборудования техническими средствами организации движения) на конкретных участках улично-дорожной сети (по отдельным локальным проектам либо в составе проектов строительства участков улично-дорожной сети).

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Организация дорожного движения : в 2-х ч. / Ю.А. Врубель. – Минск : Фонд БДД, 1996. – 634 с.
2. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 252 с.
3. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
4. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Барановичи : отчет о НИР № 485 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2007. – 114 с.
5. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети городов областного подчинения : Бобруйск : отчет о НИР № 6816 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008. – 204 с.
6. Исследования условий и организации дорожного движения на магистральной улично-дорожной сети г. Витебска : отчет о НИР № 4751 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2007. – 211 с.
7. Исследования условий дорожного движения на улично-дорожной сети г. Гродно : отчет о НИР № 4246 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2005. – 223 с.

8. Исследования условий и организации дорожного движения на магистральной улично-дорожной сети г. Могилева : отчет о НИР № 4750 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2005. – 195 с.
9. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Мозырь : отчет о НИР № 1326 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2007. – 179 с.
10. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Молодечно : отчет о НИР № 9327 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – 182 с.
11. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Новополоцк : отчет о НИР № 5486 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008. – 176 с.
12. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Пинск : отчет о НИР № 6815 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – 198 с.
13. Исследования условий дорожного движения и его организации на магистральной улично-дорожной сети города областного подчинения Полоцк : отчет о НИР № 5485 : в 2-х ч. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008. – 164 с.
14. Правила дорожного движения. – Минск : Тонпик, 2009. – 79 с.
15. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения (с изм. и доп.) : СТБ 1300-2007.

Поступила 04.08.2017

ENGINEERING EQUIPMENT AND OPERATING MODES OF LIGHT-FILM OBJECTS ON REGULATED PEDESTRIAN TRANSITIONS

E. KOT, V. YAROSHEVICH, A. GOLOVNICH, V. IVANOV

The impact of engineering arrangement, including technical means of road traffic management, and modes of operation of road traffic lights, located on a pedestrian crossing outside the safety of intersections and traffic conditions on the example of the city of Minsk are examined. The analysis allowed to generate a set of measures to improve road safety at pedestrian crossings controlled, which increases not only the road safety but also the quality of the aggregate road traffic at the locations of these transitions. It should be noted that the recommendations are systemic and are aligned to improve the quality of road traffic in the Belarus.

Keywords: *road traffic, pedestrian crossings, engineering arrangement, traffic light objects, operating modes.*

УДК 656

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ УЧАСТИЯ В ДОРОЖНОМ ДВИЖЕНИИ ПЕШЕХОДОВ

*д-р техн. наук Д.В. КАПСКИЙ; канд. техн. наук Е.Н. КОТ; О.П. ЩЕРБАК
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты проведенных социологических исследований слабо защищенных участников дорожного движения – пешеходов. Путем опроса выявлены основные закономерности, влияющие на возникновение нарушений, в том числе касающиеся технических средств регулирования и т.д. Выявлены затруднения, которые испытывают пешеходы при переходе проезжей части; выяснено их отношение к сигналам регулирования, касающихся непосредственно пешеходов. Даны рекомендации по совершенствованию некоторых пунктов правил дорожного движения.

Ключевые слова: пешеходы, дорожное движение, особенности участия, пешеходный переход, сигналы регулирования, социологическое исследование.

Введение. Дорожный транспорт, на долю которого приходится от 2/3 до 3/4 всего объема транспортного обслуживания [1], представляет собой большую и сложную социально-производственную систему. Социальной она является потому, что в ней участвует огромное количество людей, практически все население страны. Социальные аспекты управления дорожным транспортом, особенно дорожным движением, должны занять надлежащее место. Здесь в максимально возможной мере должны быть учтены психофизиологические и социальные особенности человека. Поэтому многие подходы к управлению, которые сегодня носят только технический характер, должны быть кардинально пересмотрены с учетом социальной составляющей. Социально-правовая сторона определяет взаимодействие участников в системе, а психофизиологическая связана в основном с дорожным движением, которое часто происходит на пределе человеческих возможностей, и задача состоит в максимальном приспособлении человека к движению и движения к человеку. Пешеходы – самая многочисленная, неподготовленная, трудноуправляемая и в то же время самая незащищенная категория участников движения. Прежде чем принять то или иное решение, пешеход, как и любой участник движения, оценивает это решение с двух позиций – опасность и производительность (выигрыш). Поскольку уровень специальной подготовки и знаний дорожного движения у пешехода невелик, то принимаемые им решения не всегда оптимальны – нередко случается, что вопросы элементарной безопасности менее значимы, чем незаметная для других малозначащая деталь [2; 3].

В результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с участием пешеходов ежегодно на дорогах Республики Беларусь гибнут более 640 человек [4; 5]. Необходимость изучения мнения пешеходов по поводу обеспечения безопасности людей продиктована самой жизнью и ситуацией на дорогах.

Например, как следует из интернет-источников, в 2010 году в Республике Беларусь зарегистрировано 6346 дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими. Это на 5,8% меньше, чем годом ранее. В ДТП погибли 1185 (меньше на 10,4%) и травмированы 6812 человек (меньше на 5,4%). Следует отметить, что по вине пешеходов произошло 1189 (меньше на 3,1%) аварий с пострадавшими. В них 318 человек погибли и 903 травмированы (причем по вине нетрезвых пешеходов произошло 358 аварий) [6].

Постановка задачи. Для того чтобы выявить отношение пешеходов к проблемам, возникающим в дорожном движении, проведены социологические исследования – анкетирование и опрос по специальным методикам [7; 8], благодаря чему получена достоверная информация (мнение опрашиваемых участников дорожного движения) об объективных и субъективных факторах. Авторами данной работы разработана анкета, которая была опробована методом предварительного интервью. Предварительные интервью проводились среди лиц всех тех категорий, впоследствии охваченных массовым опросом.

При проведении исследования реализовано 760 анкет, из них 2% анкет не вернулись для подведения итогов (для достоверности исследования допускается 10% невозвращенных анкет). В опросе приняли участие 740 пешеходов совершеннолетнего возраста. Из них 50,2% участников опроса мужского пола, 49,8% женского.

Полученные результаты можно считать репрезентативными, так как при проведении исследования широко варьировались методы и условия исследования, а именно выборка, инструментарий, исполнители, время проведения и т.д. Несмотря на различия в методах и условиях исследования, получены хорошо согласующиеся результаты, что может служить доказательством репрезентативности данных.

Результаты проведенных исследований нарушений пешеходами Правил дорожного движения. Среди факторов, влияющих на соблюдение пешеходами Правил дорожного движения, предполагалось наличие у них автомобиля – «источника повышенной опасности» (рисунки 1, 2).

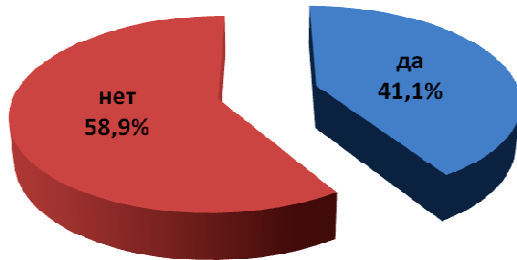


Рисунок 1. – Распределение вариантов ответов на вопрос «Имеете ли Вы свой автомобиль?»

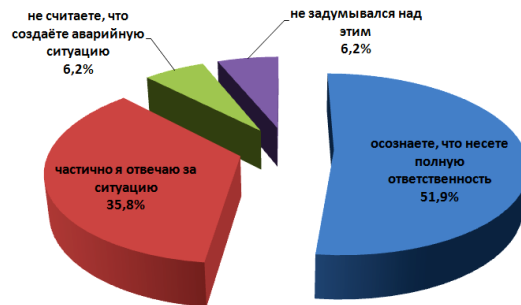


Рисунок 2. – Распределение вариантов ответов на вопрос «Как Вы оцениваете личную ответственность за ситуацию на дороге?»

Респонденты (41,1%) подчеркнули, что они имеют автомобиль; 58,9% – не имеют. Личный автомобиль имеют больший процент мужчин по сравнению с женщинами. Все владельцы автомобилей считают, что наказание для пешеходов, не выполняющих требования ПДД, должно быть строгим – административная или уголовная ответственность. Анкетирование и опрос мнения респондентов-собственников автомобилей показали, что они чаще соблюдают правила дорожного движения в качестве пешехода, чем те, у кого автомобиля нет. Выяснено, что наличие автомобиля влияет на соблюдение правил дорожного движения. Эта категория граждан хорошо представляет себе последствия несоблюдения правил.

Немаловажным является то, как пешеходы относятся к своему поведению на дороге: рассчитывают только на себя, либо склонны переносить ответственность за ситуацию на других участников движения. При изучении личной ответственности пешеходов за ситуацию на дороге выявлено: 51,9% опрошенных осознают, что несут полную ответственность; 6,2% – не считают, что создают аварийную ситуацию; столько же опрошенных не задумывались над этим вопросом.

Результаты ответов свидетельствуют о том, что пешеходы в Беларуси ответственны и сознательно подходят к вопросу безопасности. Однако мужчины в большей степени, чем женщины, осознают свою ответственность, последние склонны разделять ответственность с другими участниками дорожного движения (рисунки 3, 4).

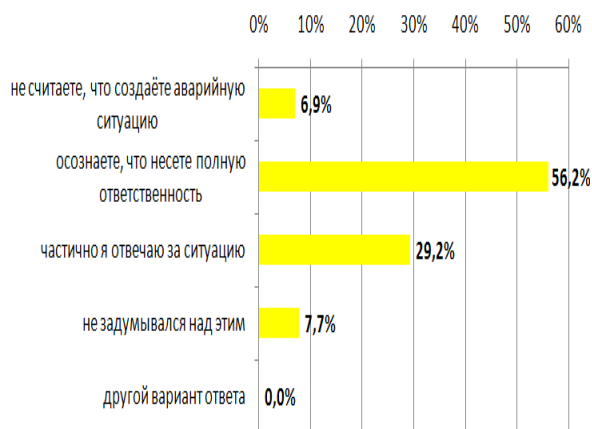


Рисунок 3. – Распределение среди мужчин вариантов ответов на вопрос «Как Вы оцениваете личную ответственность за ситуацию на дороге?»

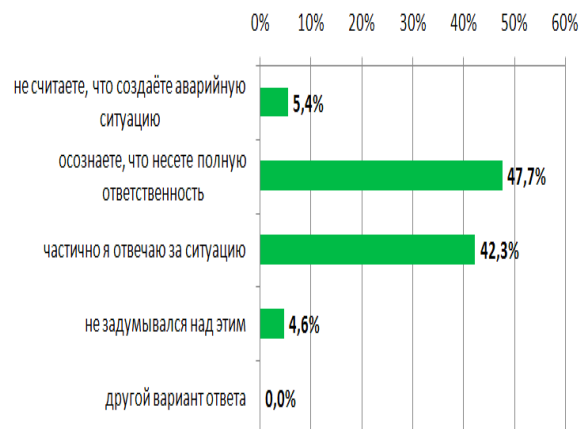


Рисунок 4. – Распределение среди женщин вариантов ответов на вопрос «Как Вы оцениваете личную ответственность за ситуацию на дороге?»

На вопрос «Нарушаете ли Вы ПДД?» 5,7% опрошенных ответили: «никогда не нарушал»; остальные 34,2% – «иногда да»; 58,6% – «старюсь не нарушать»; 1,1% предложили свой вариант: «редко нарушаю», «приходится». При этом мужчины чаще женщин признаются в том, что иногда нарушают правила дорожного движения.

Далее предстояло выяснить, по какой причине пешеходы склонны к нарушениям.

На этот вопрос 39,6% опрошенных ответили «потому, что неудобно пользоваться тем или иным способом перехода»; 33,3% сказали «потому, что тороплюсь»; 13,3% – «потому, что неисправно работает светофор»; 4,9% – «потому, что не считаю, что соблюдение ПДД поможет избежать опасности» и 2,5% нарушают правила дорожного движения потому, что так делают другие. Другими вариантами ответов были: «зависит от ситуации», «служебная необходимость» (рисунок 5).

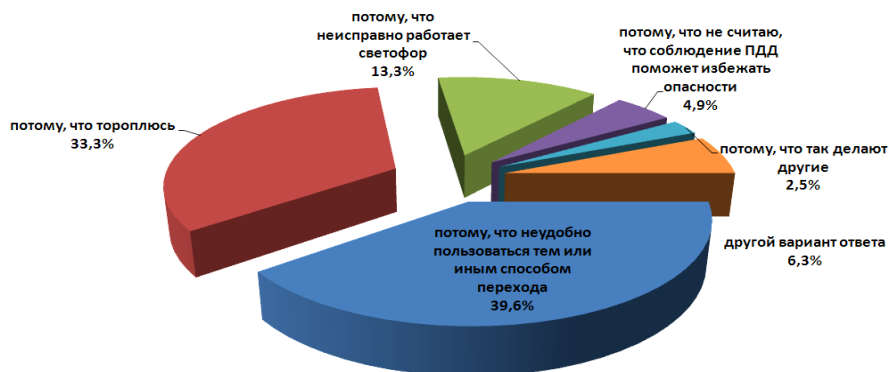


Рисунок 5. – Распределение вариантов ответов на вопрос «Какая причина вызывает у Вас необходимость нарушать ПДД?»

Как мужчины, так и женщины выделяют неудобство пользования переходами как причину нарушений – 39,2 и 40,1% соответственно. В этом же списке причин – «торопливость» опрошенных пешеходов, в которой признаются 34,5% мужчин и 32,1% женщин. Нельзя оставить без внимания и такой фактор, как неисправно работающие светофоры, так как в данном случае пешеходы также нарушают ПДД. Необходимо отметить категорию пешеходов, которые нарушают Правила заодно с другими, и тех, кто не разделяет мнение, что несоблюдение ПДД повлечет за собой опасность.

Исследования влияния технических средств регулирования (ТСР) и условий движения на поведение пешеходов. В ходе проведения исследований предстояло узнать мнение пешеходов об условиях движения на *улично-дорожной сети (УДС)*: почему и где неудобно переходить дорогу, тем самым можно выявить недостатки в организации дорожного движения, которые, в свою очередь, могут влиять на происхождение ДТП с участием пешеходов.

В результате анкетирования получены следующие результаты:

58,5% респондентов испытывают дискомфорт на нерегулируемом пешеходном переходе (рисунок 6);

25,8% – на улице с числом полос движения 4 и более;

6,2% – на регулируемом пешеходном переходе, где есть островок безопасности;

1,8% – на регулируемом пешеходном переходе;

7,6% – не испытывают дискомфорта ни в одном из мест перехода проезжей части.

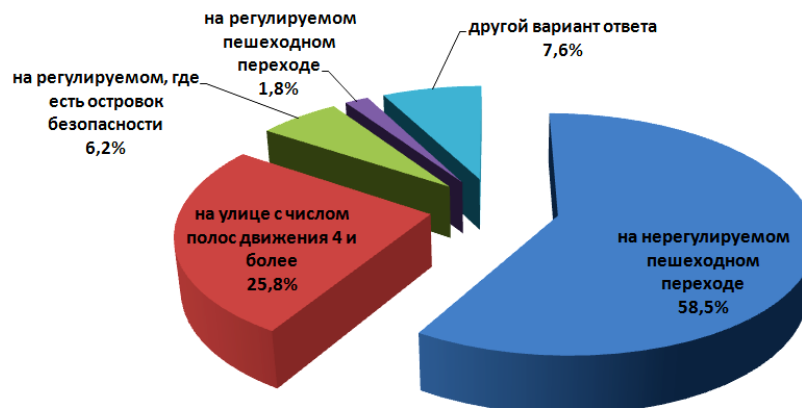


Рисунок 6. – Распределение вариантов ответов на вопрос «В каком месте переход проезжей части вызывает у Вас дискомфорт?»

Нельзя оставлять без внимания и то, что около 480 ДТП в год происходит именно на нерегулируемых пешеходных переходах. К тому же более половины опрошенных пешеходов (58,5%) указывают именно на этот элемент улиц, причем мужчины и женщины в этом вопросе солидарны.

Другим, не менее значимым вариантом ответа на этот вопрос был: «на улице с числом полос 4 и более», что имеет принципиальное значение, так как в городе Минске таких улиц немало.

Выяснив, в каких местах пешеходы испытывают дискомфорт, необходимо узнать причину этого. Поэтому следующий вопрос звучал: «По какой причине, на Ваш взгляд, трудно и неудобно выходить на проезжую часть в зоне пешеходного перехода?».

В этом случае 33,2 и 28,2% респондентов соответственно выделили такие причины, как наличие луж, ям и недостаточная видимость приближающихся автомобилей (рисунок 7); 18,0% – отсутствие дорожных знаков, дорожной разметки; 5,9% – плохое покрытие; 5,6% – плохо видны сигналы светофоров; 3,7% – отсутствует пониженный борт; 1,7% – помеха со стороны других пешеходов; 3,7% – в качестве своего варианта ответа: «водители транспортных средств не всегда уступают пешеходам».

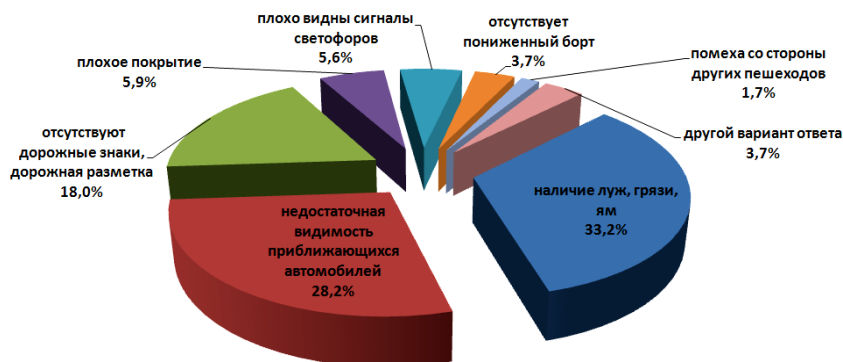


Рисунок 7. – Распределение вариантов ответов на вопрос «По какой причине, на Ваш взгляд, трудно и неудобно выходить на проезжую часть в зоне пешеходного перехода?»

Среди факторов, влияющих на комфортные условия перехода, считаем важным тот факт, что может мешать пешеходам, создавая им явные неудобства. И мужчины, и женщины отметили, что им создают неудобства наличие луж, грязи, ям на проезжей части, а также недостаточная видимость приближающихся автомобилей.

В завершение интервьюирования прозвучало мнение опрошенных о необходимости обучения пешеходов ПДД и о необходимых изменениях в системе подготовки пешеходов. Участникам опроса предлагалось высказать личное мнение о том, нужно ли изучать правила дорожного движения пешеходам.

Установлено, что 77,2% опрошенных ответили утвердительно, 10,3% выбрали ответ «не знаю», 8,4% ответили «нет» (рисунок 8). В качестве вариантов ответа прозвучало: «это просто необходимо»; «да, но в начальной школе»; «да, основным». Как видим, практически все участники опроса понимают важность этой проблемы, по крайней мере, ставят задачу изучения ПДД пешеходами на первое место.

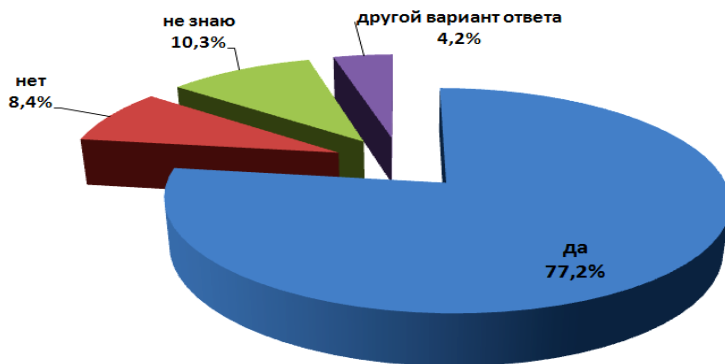


Рисунок 8. – Распределение вариантов ответов на вопрос «Считаете ли Вы необходимым учить пешеходов ПДД?»

Пешеходы, которые ответили на заданный вопрос «нет», высказали мнение, что на зеленый мигающий сигнал светофора можно начинать переходить проезжую часть. Однако следует отметить,

что и мужчины, и женщины считают необходимым уделять должное внимание подготовке пешеходов к безопасному поведению на дороге, что является позитивным фактором.

В случае, представленном на рисунке 9, пешеходы отдали предпочтение совершенствованию условий перехода проезжей части – 39,0%; отметили необходимость повышения уровня обучения – 27,2%; хотели бы иметь возможность вносить свои предложения – 10,5%; установить связь со специалистами этой сферы – 8,9%; высказались за совершенствование нормативно-правовой базы 7,3%. Другими вариантами ответов были: «повышение культуры»; «ничего не делать»; «не знаю».

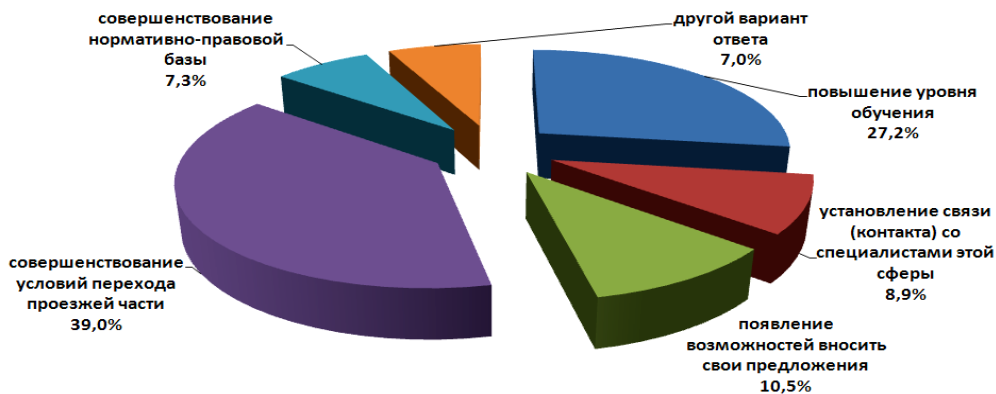


Рисунок 9. – Распределение вариантов ответов на вопрос «Какие, на Ваш взгляд, необходимы перемены в системе подготовки пешеходов для повышения их безопасности?»

Установлено, что из-за отсутствия должного информирования о режимах светофорного регулирования доля пешеходов, осуществляющих выход на проезжую часть на зеленый мигающий сигнал светофора, по сравнению с 2006 годом, увеличилась почти вдвое. При этом количество ДТП из-за неподчинения сигналам светофора осталась практически неизменной (рисунки 10, 11).

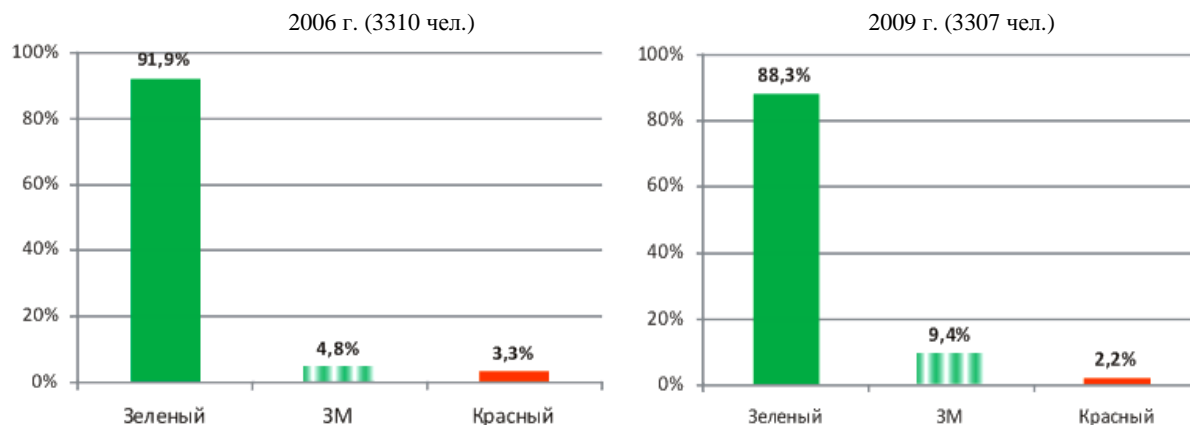


Рисунок 10. – Распределение пешеходов, выходящих на проезжую часть в зависимости от сигнала пешеходного светофора

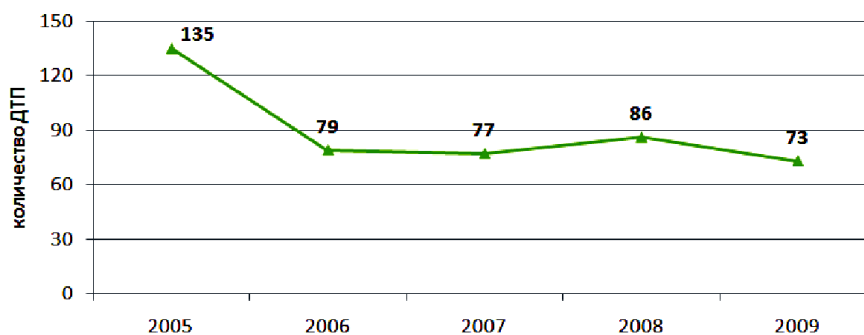


Рисунок 11. – Динамика количества ДТП из-за неподчинения сигналам светофора

Заключение. Проведенный опрос показал значительный пробел в подготовке пешеходов к дорожному движению. Мнения и оценки респондентов-пешеходов, несомненно, интересны и полезны специалистам дорожного движения для принятия управленческих решений с учетом мнений на некоторые вопросы самих пешеходов. В целом, полученные нами ответы респондентов демонстрируют следующее: практически все пешеходы понимают, что необходимо изучать Правила дорожного движения.

При переходе через улицу 51,9% пешеходов осознают, что несут полную ответственность за ситуацию на дороге, но имеются и те, кто не задумывается над этим либо считает, что не создают аварийную ситуацию; только 5,7% респондентов утверждают, что никогда не нарушают Правила дорожного движения в качестве пешеходов; около 50% пешеходов осознанно не соблюдают Правила дорожного движения, в частности, перелезая через дорожные ограждения.

Результатом является и тот факт, что респонденты открыто признаются, что не всегда сами соблюдают Правила дорожного движения. Это свидетельствует о низкой культуре уличного движения и достаточно низкой мотивацией слабо защищенных участников дорожного движения.

Полученные ответы респондентов демонстрируют также следующие моменты: выявлены затруднения, которые испытывают пешеходы при переходе проезжей части; выяснено их отношение к сигналам регулирования, касающимся непосредственно пешеходов.

На основании исследований даны рекомендации по совершенствованию некоторых пунктов Правил дорожного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – изд. 3-е перераб. и доп. – Минск : БНТУ, 2010. – 139 с.
2. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
3. Врубель, Ю.А. Организация дорожного движения : в 2-х ч. / Ю.А. Врубель. – Минск : Фонд БДД, 1996. – 634 с.
4. Аналитический сборник по аварийности / под общ. ред. Е.Е. Полудня. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2010. – 89 с.
5. Сведения о дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 1999–2008 годах и наметившиеся тенденции : анализ. сб. / под общ. ред. А.Н. Кулешова. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2009. – 144 с.
6. Белорусский портал TUT.BY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://news.tut.by:80/auto/211012_print.html. – Дата доступа: 20.06.2017.
7. Кузьмина, Е.С. Методы социальной психологии / Е.С. Кузьмина, В.Е. Семенова. – Л.: ЛГУ им. А.А. Жданова, 1977. – 175 с.
8. Рабочая книга социолога / Акад. Наук СССР. – М., 1983. – 480 с.

Поступила 09.08.2017

STUDIES OF PARTICIPATION FEATURES IN THE TRAFFIC OF PEDESTRIANS

D. KAPSKIJ, E. KOT, O. SHCHERBAK, T. VIGERINA

The results of sociological surveys of vulnerable road users – pedestrians are given. By questioning the basic patterns that influence the occurrence of violations, including those relating to technical road traffic facilities management, etc. are revealed The identified difficulties that are faced by pedestrians when crossing the roadway; clarified their relationship to the control signal that is directly related to pedestrians are shown. Recommendations for improving some rules of the road are given.

Keywords: *pedestrians, traffic, participation features, pedestrian crossing, control signal, sociological survey.*

УДК 621.793

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ НАНЕСЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ
ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ***д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**А.П. ЯЛОВИК**(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты исследования по восстановлению валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией. Показана возможность использования технологии гиперзвуковой металлизации комбинированных износо- и коррозионностойких покрытий, состоящих из сталей мартенситного и аустенитного классов, для восстановления изношенных хромированных валов. Разработана технология формирования комбинированных покрытий одновременным распылением проволок из сталей мартенситного и аустенитного классов методом гиперзвуковой металлизации с последующим трибомодифицированием.

Ключевые слова: *гиперзвуковая металлизация, хромированные валы, восстановление, комбинированные покрытия, трибомодифицирование.*

Введение. Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности пар трения скольжения типа «вал – втулка», эксплуатирующихся при повышенных удельных нагрузках, является использование композиционных пластичных смазок в сочетании с технологиями, обеспечивающими формирование металлических покрытий толщиной 0,05...0,5 мм методами газотермического напыления порошковых или проволочных материалов [1–4].

Покрытия из цветных металлов и низколегированных сталей, которые, как правило, мягче материала стальных или чугунных деталей, позволяют сравнительно легко обеспечить правило положительного градиента, согласно которому процесс деформирования отдельных, наиболее нагруженных, участков поверхностей трения должен проходить только в поверхностных слоях, не вовлекая в деформацию слои, расположенные ниже [5]. В этом случае контурные давления, возникающие в подвижном сопряжении, будут восприниматься жестким основанием. Площадь фактического контакта при использовании покрытий толщиной до 1 мм будет меньше, чем при использовании относительно толстых (1 мм и более). Слой относительно мягкого покрытия позволяет улучшить прирабатываемость деталей пар трения и способствует образованию в процессе трения адаптационных, субмикроскопических поверхностных пленок, обладающих повышенной адсорбционной способностью к смазочным материалам. Однако в силу низкой износостойкости данных покрытий их не применяют для восстановления шеек валов.

Цель и задачи исследования

Как показал сравнительный анализ методов восстановления стальных и чугунных деталей узлов трения скольжения [6; 7], наиболее эффективной и экономичной технологией является гиперзвуковая металлизация (ГМ) стальными и композиционными проволоками.

В дальнейшем технология, использующая метод ГМ была усовершенствована за счет применения метода трибомодифицирования [8]. На поверхность покрытия, полученного путем нагрева и распыления проволок из сталей мартенситного или аустенитного классов, наносили слой смазки, содержащей ультрадисперсный порошок шихты алмазосодержащей «ША» и осуществляли приработку в узле трения при удельной нагрузке 32...40 МПа и скорости скольжения 0,2...1,0 м/с. При всех значительных преимуществах этой технологии она обладает таким существенным недостатком, как невозможность ее использования взамен гальванического хромирования или при восстановлении изношенных хромированных деталей, поскольку у газотермических покрытий, напыленных известными стальными проволоками, отсутствует необходимое сочетание значений твердости и коррозионной стойкости. Если покрытие наносить распылением только проволок мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4%, то вследствие относительно высокой твердости покрытия будет отсутствовать эффект трибомодифицирования, который обеспечивается смазкой с алмазосодержащей шихтой, помимо того, покрытие не будет обладать высокой коррозионной стойкостью. Если же использовать проволоки только из сталей аустенитного класса, то будет обеспечен процесс трибомодифицирования и высокая стойкость покрытий в агрессивных средах, но при этом покрытие будет иметь недостаточную твердость.

Требуемое сочетание свойств обеспечивают композиционные проволочные материалы, состоящие из никелевой трубчатой оболочки и износостойкого порошкообразного наполнителя, однако стоимость таких материалов в 4,0...6,5 раз больше стоимости литых стальных проволок.

Разработка технологии, позволяющей восстанавливать ранее хромированные валы нанесением покрытий с необходимым уровнем износо- и коррозионной стойкости и явилась целью представленного исследования.

Оборудование и методики исследований

Для исследования были выбраны хромсодержащие стали мартенситного класса с содержанием углерода от 0,2 до 1,1% и хрома от 13 до 18%, дополнительно легированные никелем, марганцем, ванадием, молибденом, вольфрамом, кремнием следующих марок: 20X13, 30X13, 40X13, 40X15H7Г7Ф2МС, 45X14H14B2M, 65X13, 90X18MФ, 95X18, 110X18M, а также высокохромистые никельсодержащие стали мартенситного класса с содержанием углерода от 0,08 до 0,17%, хрома – 18...25% и никеля 9...16%, дополнительно легированные титаном, следующих марок: 08X18H10T, 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H12T, 12X25H16T7, 17X18H9.

Для газотермического напыления композиционных покрытий использовались проволоки диаметром 1,5, 1,6, 1,8 и 2,0 мм в различных сочетаниях. Нанесение покрытий осуществлялось на установке гиперзвуковой металлизации АДМ-10 на режимах, соответствующих паспортным, для распыления стальных проволок.

Содержание остаточного аустенита в газотермических покрытиях оценивалось методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном CoK_α излучении. Съемка образцов осуществлялась при ускоряющем напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводилась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 10 с на точку.

Результаты экспериментов. Одним из возможных подходов формирования композиционных газотермических покрытий, отвечающих принципу Шарпи (материал, отвечающий высоким требованиям по износостойкости, должен состоять из сплошной вязкой матрицы, в которой расположены твердые структурные составляющие), может быть одновременное распыление стальных проволок аустенитного и мартенситного классов. При этом частицы аустенитной стали образуют вязкую коррозионно-стойкую матрицу, в которой на стадии приработки узла трения может быть реализован эффект трибомеханического модифицирования с формированием наноразмерной зеренной ячеистой субструктуры [8], а частицы мартенситной стали образуют дисперсные включения с повышенным содержанием остаточного аустенита [9], в котором на начальной стадии эксплуатации будут протекать деформационно активируемые $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с образованием твердых включений мартенсита деформации.

Для обеспечения достаточно высокого содержания упрочняющей фазы в композиционном покрытии содержание остаточного аустенита в нем должно быть в пределах 45...60 об.%. При его содержании менее 45 об.% количество формирующегося мартенсита деформации и твердость покрытия после приработки будут недостаточными для обеспечения высокой абразивной износостойкости рабочего слоя, а при содержании более 60 об.% после приработки может сформироваться чрезмерно твердое покрытие низкой трещиностойкости, которое будет иметь недостаточную износостойкость в условиях ударных нагрузок. Вязкая и износостойкая матрица композиционного покрытия может быть получена в процессе трибомеханического модифицирования элементов газотермического покрытия, сформированных из напыленных частиц аустенитной стали, с образованием в них наноразмерной субзеренной структуры, в то время как твердые включения образуются в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в напыленных частицах мартенситной стали в процессе деформационного воздействия при приработке.

Поскольку механические и физические свойства высокохромистых аустенитных сталей определяются количеством аустенита, перешедшего в мартенсит, а также температурой мартенситного превращения (чем ниже, тем лучше), необходимо, чтобы концентрация никеля в высокохромистой стали аустенитного класса, как одного из наиболее активных аустенитообразующих элементов, составляла не менее 10 об.%.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал (таблица 1), что для формирования покрытий с содержанием остаточного аустенита в пределах 45...60% (опыты № 8, 9, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 28, 29, 32, 33) необходимо, чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10%, в качестве другой проволоки – высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4%, причем ее диаметр должен быть в 1,2...1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса.

Для практической проверки полученных результатов исследований были выбраны для восстановления изношенные хромированные штоки гидроцилиндров выправочно-подбивочно-рихтовочной маши-

ны ВПР, используемой при ремонте железнодорожного полотна. У изношенных штоков на рабочей поверхности наблюдались риски, вырывы, отслаивания хромового покрытия, царапины, следы схватывания и коррозии. Кроме этого, в соединении штока с поршнем обнаруживались следы стирания и вмятин, а на торцевых участках, контактирующих с поршнем, – царапины и следы схватывания. Износ составлял в среднем 0,15 мм, что не позволяло применять повторное хромирование рабочих поверхностей штоков.

Таблица 1. – Зависимость содержания остаточного аустенита в покрытиях после гиперзвуковой металлизации различными сочетаниями проволок (проволока 1 – мартенситного класса, диаметром D_1 ; проволока 2 – аустенитного класса, диаметром D_2)

№ опыта	Марки напыляемых стальных проволок		Диаметр проволоки, мм		Соотношение диаметров проволок D_1/D_2	Содержание остаточного аустенита, об.%
	проволока № 1	проволока № 2	D_1	D_2		
1	20X13	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	33
2	30X13	17X18H9	1,8	1,5	1,20	38
3	40X13	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	40
4	40X13	17X18H9	1,8	1,5	1,20	42
5	30X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	40
6	30X13	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	38
7	40X13	08X18H10T	2,0	1,8	1,11	43
8	40X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	46
9	40X13	08X18H10T	1,8	1,5	1,20	50
10	40X13	08X18H10T	2,0	1,6	1,25	62
11	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	2,0	1,8	1,11	62
12	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	1,8	1,6	1,12	53
13	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	1,8	1,5	1,20	58
14	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	2,0	1,6	1,25	65
15	45X14H14B2M	12X18H10T	2,0	1,8	1,11	62
16	45X14H14B2M	12X18H10T	1,8	1,6	1,12	52
17	45X14H14B2M	12X18H10T	1,8	1,5	1,20	56
18	45X14H14B2M	12X18H10T	2,0	1,6	1,25	61
19	65X13	08X18H10T	2,0	1,8	1,11	63
20	65X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	55
21	65X13	08X18H10T	1,8	1,5	1,20	57
22	65X13	08X18H10T	2,0	1,6	1,25	62
23	90X18МФ	12X18H12T	2,0	1,8	1,11	67
24	90X18МФ	12X18H12T	1,8	1,6	1,12	56
25	90X18МФ	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	60
26	90X18МФ	12X18H12T	2,0	1,6	1,25	66
27	95X18	12X18H10T	2,0	1,8	1,11	63
28	95X18	12X18H10T	1,8	1,6	1,12	55
29	95X18	12X18H10T	1,8	1,5	1,20	58
30	95X18	12X18H10T	2,0	1,6	1,25	65
31	110X18M	12X25H16Т7	2,0	1,8	1,11	65
32	110X18M	12X25H16Т7	1,8	1,6	1,12	57
33	110X18M	12X25H16Т7	1,8	1,5	1,20	60
34	110X18M	12X25H16Т7	2,0	1,6	1,25	65
35	90X18МФ	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	62
36	110X18M	17X18H9T	1,8	1,5	1,20	68

Жирным шрифтом выделены результаты наиболее удачных опытов.

Для восстановления штоков гидроцилиндров использовали установку гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10.

В качестве материала одной проволоки использовали высокохромистую сталь мартенситного класса марки 40X13 с содержанием углерода 0,42%, диаметром $D_1 = 1,8$ мм.

В качестве материала другой проволоки использовали высокохромистую сталь аустенитного класса марки 12X18Н10Т с содержанием никеля 10%, диаметром $D_2 = 1,6$ мм.

Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносили промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80.

После напыления покрытия и шлифования до окончательного размера (рисунок) на покрытие наносился слой модифицированной смазки Литол-24.



**Рисунок 1. – Восстановленные штоки
после обработки**

Модифицирование осуществляли алмазно-графитовой шихтой ША-А (ТУ РБ 1000561180.003-2003), содержание которой составило 0,25 мас. %.

Приработку восстановленных штоков осуществляли при удельной нагрузке 40 МПа и скорости скольжения 0,25 м/с в течение 2 ч.

Испытания, проведенные в условиях подконтрольной эксплуатации при удельных нагрузках от 15 до 45 МПа, показали, что на поверхности штоков после 450...490 ч работы заметных следов изнашивания или коррозии не наблюдалось.

Выводы

Разработанная технология формирования комбинированных покрытий одновременным распылением проволок из сталей мартенситного и аустенитного классов методом гиперзвуковой металлизации с последующим трибомодифицированием может быть рекомендована для восстановления изношенных поверхностей деталей узлов трения скольжения, которые были покрыты гальваническим хромом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь, П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск : Белорус. наука, 2006. – 363 с.
2. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. – М. : Мир, 2000. – 518 с.
4. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.

5. Белый, А.В. Трибология: исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / А.В. Белый, К. Лудема, Н.К. Мышкин. – М. : Машиностроение ; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – 454 с.
6. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр. (Минск, 30–31 окт. 2008 г.) ; редкол. : М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 479–484.
7. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю.С. Коробов [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня : материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2011. – Ч. 1. – С. 164–171.
8. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.
9. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия (РФ), 2008. – № 10. – С. 39–44.

Поступила 10.07.2017

RESTORATION OF SHAFTS BY COVERING WITH COMBINED COATINGS BY THE MEANS OF HYPERSONIC METALLIZATION

M. BELOTSEKOVSKY, V. ZHORNIK, A. YALOVIK, A. DUDAN

The results of the research of shaft restoration by covering them with combined coatings by the means of hypersonic metallization are presented. Possible usage of hypersonic metallization of combined wear- and corrosion resistant surfaces, which consist of martensitic and austenitic classes of steel for restoration of worn chromium-plated shafts is shown. The technology of forming of combined coatings by simultaneous pulverization of metal wire from martensitic and austenitic classes of steel by the means of hypersonic metallization with following tribomodification is developed.

Keywords: *hypersonic metallization, chrome-plated shafts, restoration, combined coatings, tribomodified.*

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ. ОХРАНА ТРУДА

УДК 665.6:661.183:502:504

ПОЛУЧЕНИЕ СОРБЕНТА ДЛЯ СБОРА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ РАЗЛИВАХ ПУТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ;
канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, Е.И. МАЙОРОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Установлена возможность ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов с твердой поверхности с использованием сорбента на основе отходов агропромышленного комплекса (шелухи (лузги) ячменной, околоплодников редьки, околоплодников (скорлупы) арахиса). Изучена сорбционная способность отходов агропромышленного комплекса по отношению к нефти и нефтепродуктам с различной плотностью. Выполнен сравнительный анализ предлагаемых образцов с промышленными аналогами. Перспективно и экономически целесообразно направление утилизации отходов агропромышленного комплекса в качестве сорбента в технологических процессах удаления нефти и нефтепродуктов при их аварийных разливах благодаря низкой стоимости и широкой сырьевой базе, достаточной нефтеемкости, возможности использования насыщенных углеводородами сорбентов без повторного загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукт, сорбент, отходы агропромышленного комплекса.

Введение. Изучение и разработка технологий локализации и ликвидации аварийных ситуаций, связанных с разливом нефти и нефтепродуктов является важной задачей экологической безопасности, актуальной в современных условиях безопасности деятельности человека. При разливе и попадании на почву нефть и нефтепродукты вначале растекаются по поверхности, делая ее скользкой, затем мигрируют в нижележащие слои, создавая угрозу попадания в водоносные слои грунтовых вод. Высокомолекулярные нефтяные углеводороды при аварийных разливах заполняют все поры почвенного покрова, обволакивают корни растений, лишая почву и растения свободного влагообмена и дыхания, что приводит к полной деградации биоценоза, появляется радужная пленка, увеличивается гидрофобность почв, ухудшается ее аэрация, ароматические углеводороды значительно угнетают рост высших растений [1–3]. При этом ухудшается плодородие почв, возрастает отношение C:N, ухудшается азотный режим, уменьшается кислотность почвенного раствора, увеличивается содержание органического вещества, что ведет к нарушению естественного почвообразования. Аварийное загрязнение почвы вызывает изменение растительного покрова, уменьшает видовое разнообразие растений или вызывает их полное уничтожение. У растений замедляется рост, нарушаются функции фотосинтеза и дыхания, изменяется структура хлоропластов, в значительной мере страдают корневая система, листья, стебли, репродуктивные органы.

Нефтяные углеводороды вызывают массовую гибель почвенной мезофауны, более устойчивыми оказываются простейшие [1–3]. Попадая в воду, нефтяные углеводороды мигрирует в различных формах: в виде поверхностной пленки, в эмульгированной форме, растворенной и сорбированной взвешенными веществами, последние оседают на дно, накапливаясь в донных отложениях. Увеличивается риск накопления нефтепродуктов в пищевой цепи водного биоценоза с угрозой здоровью человека при употреблении некачественной рыбы [1–3]. Нефтяная пленка нарушает газообмена в водной среде, изолирует воду от поступления в нее атмосферного кислорода, замедляя фотосинтез и образование кислорода, нарушая биологические процессы самоочистки природной среды. Это приводит к затуханию развития планктонических форм, что сказывается на цепи питания гидробионтов, населяющих водоем, вызывая тем самым ее разрушение. Для водных организмов нефтяные углеводороды являются высокотоксичными веществами и относятся к группе нервнопаралитических ядов [1–12].

Нефть и нефтепродукты могут проявлять хроническую токсичность для водных организмов и привести к изменению численности и ограничению видового разнообразия педобионтов (почвенной мезо- и микрофауны и микрофлоры) [1–13].

Таким образом, попадание нефти и ее компонентов в окружающую среду (воздух, воду или почву) вызывает изменение их физических, химических и биологических характеристик, нарушая протекание естественных биохимических процессов. Ликвидация нефтяных загрязнений не обходится без применения различного рода сорбционных материалов. Нефтяные сорбенты – материалы, способные впитывать в больших количествах нефтепродукты, препятствуя тем самым их миграции в окружающей среде [14].

В качестве сорбентов для утилизации нефтепродуктов используют синтетические, неорганические, органоминеральные и биологические сорбенты [14]. Особый интерес представляет поиск и исследование материалов, обладающих высокими сорбционными характеристиками и имеющих органическую основу. Этот факт особенно важен, так как при решении вопросов утилизации и (или) регенерации сорбентов органического происхождения возможно их рациональное использование, в частности для получения тепловой энергии без вторичного загрязнения окружающей среды. В последние годы активно выполняется поиск в области получения недорогих нефтяных сорбентов для сбора проливов углеводородов.

1. *Применение необработанных растительных отходов.* Например, способ получения нефтяного сорбента на основе необработанной лузги (шелухи) зерен гречихи путем неоднократного ее нанесения на нефтяное пятно на поверхности воды с последующим сбором, в частности с помощью сетки [15]. Однако полученный сорбент характеризуется низкой сорбционной способностью.

2. *Термические способы получения нефтяных сорбентов из растительных ресурсов агропромышленного комплекса,* таких как: карбонизированная лузга зерен гречихи [16]; карбонизированные отходы получения ячменя [17]; карбонизированная рисовая шелуха [18]; карбонизированная лузга зерен риса [19]; продукт пиролиза рисовой шелухи [20]; карбонизированная шелуха подсолнечника [21]; модифицированная и карбонизированная шелуха подсолнечника [22]. Общий недостаток термических способов получения нефтяных сорбентов – необходимость высокотемпературной обработки растительных ресурсов агропромышленного комплекса с целью их перевода в золу либо активированный уголь. Применение данных способов снижает выход сорбента из-за пиролиза и обугливания вторичных растительных ресурсов агропромышленного комплекса и приводит к потере значительной части органической составляющей отходов, которые могут быть источником для получения ряда ценных органических веществ (полисахаридов, пигментов и др.) [23; 24]; кроме того, указанные способы требуют больших энергозатрат и применения энергоемкого дорогостоящего оборудования, зачастую сложного в эксплуатации.

3. *Способы получения нефтяных сорбентов из растительных ресурсов агропромышленного комплекса, основанные на химическом модифицировании сырья,* например, получение сорбентов из скорлупы грецких орехов, обработанных концентрированной соляной кислотой, а затем 33%-ным раствором гидроксида натрия для удаления балластных веществ [25]; из отходов переработки зернового и масличного сырья путем их обработки двуокисью углерода в сверхкритических условиях при температуре 40...60 °С и давлении 10...25 МПа [26]; на основе гречневой шелухи, обработанной в экстрагирующем растворе оксалата аммония либо минеральной кислоты (соляной, серной или азотной кислот) с концентрацией 0,1...0,5 Н при 60...90 °С [27]; из рапса или рапсового жмыха, который подвергают гидролизу 30...50% раствором кислоты, сорбция изучена по ионам металлов [28]. Общими недостатками данных способов является необходимость применения концентрированных кислот и щелочей, химически стойкой аппаратуры, сверхкритических условий, многостадийность процессов, образованием токсичных сточных вод.

Несмотря на имеющиеся в этом направлении разработки, вопросам исследования сбора нефти и нефтепродуктов с различных поверхностей и оценки эффективности применения сорбентов на основе отходов агропромышленного комплекса не уделяется достаточного внимания, что и определило цель настоящего исследования – *получение сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса.* При этом снижается стоимость получаемого сорбента за счет использования дешевого сырья (отхода производства), обеспечивается высокая сорбционная способность по нефти и нефтепродуктам, высокий процент выхода готового продукта из исходного сырья.

Методы исследований. Для исследования использовались следующие образцы отходов агропромышленного комплекса: шелуха (лузга) ячменная *Hordeum vulgare*, околоплодники редьки масличной *Raphanus* и околоплодники арахиса *Arachis hypogaea*. Исходные образцы подвергались высушиванию до содержания влаги не более 10% масс. и нескольким ступеням дробления: первичное измельчение на дисковой рубительной машине, на втором этапе производилось доизмельчение частиц коры с получением частиц заданного гранулометрического состава до 1,0 мм путем сухого механического размола на мельнице. После измельчения образцы подвергали сухому фракционированию на лабораторных ситах, для исследования выделена фракция 0,25...1 мм. Далее обработка образцов осуществлялась тремя способами:

1) в экстрактор с мешалкой загружали 1 кг сырья, подавали дистиллированную воду, массовое соотношение сырье:вода составило (1:50)...(1:100). Условия процесса: температура (23±2) °С; давление – атмосферное. Время экстракции – 48 ч; перемешивание постоянное. Твердый остаток отфильтровывали на пористом фильтре и высушивали при температуре (103±2) °С до постоянной массы. Выход сорбента составил (% масс.): 82,5 – из шелухи ячменной; 92,3 – из околоплодников редьки; 95,0 – из околоплодников арахиса;

2) в экстрактор с мешалкой, рубашкой (электроподогрев) и холодильником-конденсатором загружали 1 кг сырья, подавали дистиллированную воду, массовое соотношение сырье:вода – (1:50)...(1:100). Условия процесса: температура (100±5) °С; давление атмосферное; время экстракции – 3 часа; перемешивание постоянное. Твердый остаток отфильтровывали на пористом фильтре и высушивали при темпе-

ратуре (103 ± 2) °С до постоянной массы. Выход сорбента составил: 81,1% масс. – из шелухи (лузги) ячменной; 91,2 – из околоплодников редьки и 85,5 – из околоплодников арахиса;

3) в экстрактор с мешалкой, рубашкой (электроподогрев) и холодильником-конденсатором загружали 1 кг сырья, подавали 1...1,5%-ный водный раствор гидроксида натрия, массовое соотношение сырье:раствор гидроксида натрия (1:50)...(1:100). Условия процесса: температура (101 ± 2) °С, давление – атмосферное. Время экстракции – 1 ч, перемешивание – постоянное. Твердый остаток отфильтровывали на пористом фильтре, промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции и высушивали при температуре (103 ± 2) °С до постоянной массы. Выход сорбента составил: 39,5% масс. – из шелухи (лузги) ячменной; 45 – из околоплодников редьки; 56,6 – околоплодников арахиса.

Для полученных продуктов определена адсорбционная емкость по йоду (по ГОСТ 6217) и метиленовому синему (по ГОСТ 4453). Сорбционная способность (нефтеемкость) по отношению к нефти и нефтепродуктам (керосину, дизельному топливу и вакуумному (масляному) дистилляту первого погона) определена по известной методике [29].

Результаты и их обсуждение. Наибольший потенциальный выход сорбента из трех предлагаемых способов получен по первому способу – холодной водой экстрагируются в основном такие балластные экстрактивные вещества, как моносахариды, красители, гликозиды. Меньший выход нефтяного сорбента наблюдается при горячей экстракции водой по второму способу, поскольку удаляются кроме моносахаридов, гликозидов также белки, аминокислоты, пектиновые вещества и моноолиго- и полисахариды. Выход нефтяного сорбента на уровне 40...57% масс. из рассматриваемых отходов агропромышленного комплекса отмечен при применении третьего способа, при этом экстрагируемыми веществами разбавленным водным раствором гидроксида натрия будут: смолы, жиры, полифенольные кислоты, лигнуминовые вещества, низкомолекулярный лигнин, полисахариды. В таблице 1 представлены обобщенные данные по адсорбционной емкости по йоду и метиленовому синему.

Таблица 1. – Адсорбционная емкость по йоду и метиленовому синему

Наименование сорбента	Адсорбционная емкость			
	в нативном (природном) виде	по способу 1) после холодной экстракции	по способу 2) после горячей экстракции	по способу 3) после щелочной обработки
<i>Адсорбционная емкость по йоду, %</i>				
Околоплодник редьки	24,36	24,78	26,88	28,98
Шелуха ячменная	22,37	22,47	23,52	28,56
Околоплодник арахиса	17,15	19,47	21,00	24,56
<i>Адсорбционная емкость по метиленовому синему, мг/г</i>				
Околоплодник редьки	146,23	195,23	195,61	225,10
Шелуха ячменная	95,11	143,33	180,00	210,00
Околоплодник арахиса	62,50	71,25	159,17	174,17

Адсорбционная активность по йоду характеризует объем микропор (около 1 нм) и, соответственно, способность к сорбции относительно низкомолекулярных органических веществ [30].

Из таблицы 1 видно, что по данному показателю полученные образцы приближаются к энтеросорбентам промышленного производства, например белорусскому энтеросорбенту «Полифам» (адсорбционная активность по йоду составляет 24,16%) и к российскому марки «Полифепан» (29,63%), что свидетельствует о развитии пористой структуры остатков при применении трех предлагаемых способов.

Адсорбционная емкость по метиленовому синему позволяет судить о содержании в сорбенте микропор с размерами эффективных диаметров 1,5...1,7 нм и косвенно характеризует сорбционную способность по отношению к нефтепродуктам [30]. Из таблицы 1 видно, что обработка образцов дистиллированной водой и разбавленной щелочью приводит к формированию дополнительных пор до 1,7 нм. Следует отметить, что по данному показателю сорбенты, полученные по третьему способу из околоплодников редьки и шелухи ячменной более эффективны, чем производимые промышленным способом энтеросорбенты, такие как активированный уголь (210 мг/г) и «Полифепана» (125,8 мг/г).

Сорбционная способность (нефтеемкость) по отношению к нефти и нефтепродуктам (керосину, дизельному топливу и вакуумному (масляному) дистилляту первого погона производства ОАО «Нафтан») представлена в таблице 2.

Анализ сорбционной способности отходов агропромышленного комплекса по отношению к нефти и нефтепродуктам показал:

- при обработке холодной водой по первому способу за счет увеличения объема пор в твердых остатках сорбционная способность увеличивается по нефти в 1,9 раза для околоплодников арахиса, в 3,0 раза – для шелухи ячменной, в 3,7 раза – для околоплодников редьки;

- при обработке горячей водой в результате увеличения объема пор в твердых остатках сорбционная способность повышается по нефти в 2,3 раза для околоплодников арахиса, в 3,2 раза – для шелухи ячменной и в 4,0 раза – для околоплодников редьки;

- в результате щелочной обработки слабым раствором гидроксида натрия увеличение объема пор в твердых остатках приводит к повышению сорбционной способности по нефти в 2,5 раза для околоплодников арахиса, в 4,2 раза – для шелухи ячменной, в 5,5 раза – для околоплодников редьки.

При этом экономически эффективная сорбционная способность сорбентов свыше 3,0 г/г установлена при обработке всеми тремя предлагаемыми способами.

Таблица 2. – Сорбционная способность по отношению к нефти и нефтепродуктам

Наименование сорбента	Нефтеемкость (сорбционная способность), г/г			
	в нативном (природном) виде	по примеру 1) после холодной экстракции	по примеру 2) после горячей экстракции	по примеру 3) после щелочной обработки
<i>Сорбционная способность по отношению к нефти (плотностью 861 г/см³)</i>				
Околоплодник редьки	2,42	9,00	9,76	13,25
Шелуха ячменная	3,07	9,26	9,96	12,80
Околоплодник арахиса	2,29	4,55	5,32	5,74
<i>Сорбционная способность по отношению к вакуумному (масляному) дистилляту первого погона (плотностью 886 г/см³)</i>				
Околоплодник редьки	2,71	7,89	7,93	15,45
Шелуха ячменная	3,16	7,42	7,68	15,25
Околоплодник арахиса	2,80	3,53	3,86	4,72
<i>Сорбционная способность по отношению к дизельному топливу (плотностью 825 г/см³)</i>				
Околоплодник редьки	2,43	7,11	7,65	13,18
Шелуха ячменная	3,00	8,64	7,88	9,68
Шелуха арахиса	2,32	4,75	4,99	4,97
<i>Сорбционная способность по отношению к керосину (плотностью 787 г/см³)</i>				
Околоплодник редьки	2,35	7,01	7,53	11,93
Шелуха ячменная	3,06	7,09	7,55	10,43
Околоплодник арахиса	2,34	3,06	3,74	3,86

Благодаря экологической чистоте, широкой сырьевой базе, достаточно высокой нефтеемкости при низкой стоимости (например, цена сорбентов на основе шелухи ячменной может быть от 8 до 338 у.е./т) сорбенты на основе отходов агропромышленного комплекса могут успешно конкурировать с промышленно производимыми аналогами (например, широко применяемого в Беларуси для сбора проливов нефти и нефтепродуктов в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей промышленности (в частности на ОАО «Нафтан»), в транспортных, железнодорожных и авиакомпаниях, на бензозаправочных станциях сорбента из фрезерного торфа «Белнефлесорб-экстра» (ценой около 400 у.е./т), емкость сорбции по сырой нефти которого, как указывает производитель, до 3 кг загрязнителя на 1 кг сорбента).

Заключение. На основе проведенного исследования малозатратным способом получены сорбенты с высокой сорбционной способностью для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса: шелухи ячменной, околоплодников редьки и арахиса. Предлагаемые сорбенты могут рассеиваться при очистке различных загрязненных поверхностей бетона, асфальта, металлов, грунта (глина, песок) от поллютанта вручную, механическими или пневматическими устройствами, далее собранный конгломерат из пропитанного углеводородами сорбента может подвергаться извлечению нефти (нефтепродукта) компрессионными методами. Остаток может использоваться в качестве топливных брикетов с повышенной теплотворной способностью. Нефлесорбенты из отходов агропромышленного комплекса обладают способностью к биоразложению под действием аборигенных почвенных или искусственно внесенных микроорганизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bulauka, Yu. Oil-sorbents on the basis of vegetable raw materials for collecting oil spill and petroleum products / Yu. Bulauka, E.I. Mayorava, S.F. Yakubouski // Эколого-енергетичні проблеми сучасності : зб. наук. праць всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, Одеса, 14 квітня 2017 р. – Одеса : Вид-во ОНАХТ, 2017. – С. 9–11.

2. Майорова, Е.И. Нефтяные сорбенты на основе отходов агропромышленного комплекса / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Системы обеспечения техносферной безопасности : материалы IV Всерос. конф. и школы для молодых ученых (с международным участием). – Таганрог : ЮФУ, 2017. – С. 82–84.
3. Майорова, Е.И. Анализ пористости и сорбционных свойств отходов растениеводства, получение на их основе нефтяных сорбентов / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Дальневосточная весна – 2017 : материалы 15-й междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 5 июня 2017 г. ; редкол.: И.П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – С. 92–95.
4. Булавка, Ю.А. Нефтяные сорбенты на основе местного сырья / Ю.А. Булавка, С.Ф. Якубовский, Е.И. Майорова // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортзамещение: проблемы и пути решения : сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 2 т. – Т. 1. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 309–311.
5. Якубовский, С.Ф. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов с использованием сорбента на основе целлюлозосодержащего растительного сырья / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е.И. Майорова // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по материалам IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч., Воронеж, 15–16 дек. 2015 г. : в 2-х ч. Ч. 1 ; Воронеж. ин-т ГПС МЧС России. – Воронеж, 2015. – С. 467.
6. Якубовский, С.Ф. Сорбенты для аварийного разлива нефтепродуктов на основе местного целлюлозосодержащего растительного сырья / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е.И. Майорова // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 19–20 мая 2016 г. / М-во по чрезвычай. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол.: А.Э. Набатова (науч. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – 520 с.
7. Майорова, Е.И. Сорбенты для аварийного разлива нефтепродуктов на основе целлюлозосодержащего растительного сырья / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. материалов X междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) : в 2-х ч. Ч. 2. – Минск : КИИ МЧС РБ, 2016. – С. 16–17.
8. Нефлесорбенты на основе растительного сырья для сбора пролива нефти и нефтепродуктов / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Ғылым және білім – 2017 : студенттер мен жас ғалымдардың XII Халықаралық ғылыми конференциясы = // Science and education – 2017 : The XII International Scientific Conference for students and young scholars = Наука и образование – 2017 : XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых. – Астана, 2017. – С. 1119–1123.
9. Майорова, Е.И. Нефлесорбционная способность отходов растениеводства / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. материалов XI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов). – Минск : УГЗ, 2017. – С. 161–162.
10. Майорова, Е.И. Нефлесорбенты на основе целлюлозосодержащих отходов / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Безопасность – 2017 : материалы докл. XXII Всерос. студенческой науч.-практ. конф. с междунар. участием «Проблемы экологической и промышленной безопасности современного мира», Иркутск, 24–27 апр. 2017 г. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 187–189.
11. Майорова, Е.И. Сорбенты для аварийного разлива нефтепродуктов на основе растительного сырья / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Нефть и газ – 2017 : сб. тез. 71-й междунар. молодеж. науч. конф., Москва, 18–20 апр. 2017 г.). Т. 2. – М. : РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017. – С. 385.
12. Майорова, Е.И. Нефлесорбционная способность отходов растениеводства / Е.И. Майорова, С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. материалов XI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов). – Минск : УГЗ, 2017. – С. 161–162.
13. Якубовский, С.Ф. Сорбенты для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на основе отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е. И. Майорова // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций : противодействие современным вызовам и угрозам : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Минск : УГЗ, 2017. – С. 206–208.
14. Каменщиков, Ф.А. Нефтяные сорбенты / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 268 с.
15. Патент RU 2114064. – Оpubл. 1998.
16. Патент RU 2031849. – Оpubл. 1995.
17. Патент RU 2315712. – Оpubл. 2005.
18. Патент RU 2036843. – Оpubл. 2005.

19. Патент RU 2259875. – Оpubл. 2005.
20. Патент RU2304559. – Оpubл. 2005.
21. Патент RU 2527095. – Оpubл. 2012.
22. Патент RU 2395336. – Оpubл. 2010.
23. Якубовский, С.Ф. Выделение антоцианидиновых красителей из отходов обработки древесины / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е.И. Майорова // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Уфа : Изд-во «Нефтегазовое дело», Т. 1, 2016. – С. 200–202.
24. Mayorava, K. The allocation of anthocyanidin dyes from forest wastes / K. Mayorava, S. Yakubouski, Yu. Bulauka // European and national dimension in research. Technology (Европейский и национальный контексты в научных исследованиях) : Electronic collected materials of ix junior researchers' conference, Novopolotsk, april 26–27, 2017 / Polotsk state university ; Ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2017. – P. 200–201.
25. Патент RU 2172209. – Оpubл. 1999.
26. Патент RU 2486955. – Оpubл. 2012.
27. Патент RU 2316393. – Оpubл. 2008.
28. Патент BY 6026. – Оpubл. 2004.
29. Baltrenas, P. Oil product uptake by biosorbents / P. Baltrenas, V. Vaishis // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – V. 40, № 1–2. – P. 54–58.
30. Особенности микроструктуры отходов сухой окорки сосны как сырья для получения нефтяных сорбентов / С.Ф. Якубовский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 154–157.

Поступила 11.08.2017

OBTAINING OF SORBENT FOR CRUDE OIL AND PETROLEUM PRODUCTS COLLECTION IN THEIR SPILLING BY WASTE DISPOSAL OF AGRICULTURAL COMPLEX

S. YAKUBOUSKI, YU. BULAUKA, K. MAYORAVA

The possibility of liquidation of crude oil and oil products spills from a solid surface has been established using the waste of the agricultural complex (husks of barley, pericarp radish, pericarp (shell) of peanuts). The sorption ability of agricultural complex waste in relation to crude oil and oil products with various density has been studied. A comparative analysis of the proposed samples with industrial analogues has been done. Prospectively and economically expedient is the direction of recycling of agricultural waste as a sorbent in the technological processes of crude oil and petroleum product removal during emergency spills due to low cost and wide resource base, sufficient petroconductivity, the possibility of using hydrocarbon saturated sorbents without re-contaminating the environment.

Keywords: crude oil, oil product, sorbent, agricultural complex waste.

УДК 665.766.4

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ВЫСОКОЩЕЛОЧНЫХ БЕЗЗОЛЬНЫХ СУКЦИНИМИДНЫХ ПРИСАДОК
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАЛОЗОЛЬНЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ**

*А.В. ФАКЕЕВ; канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ; канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ
(Полоцкий государственный университет);
К.П. АНТУХ; Д.С. НИКОЛИН
(СООО «ЛЛК-НАФТАН»)*

Исследуется синтез высокощелочной сукцинимидной присадки на основе полиаминов различного строения. Рассмотрена возможность получения малозольного моторного масла категории СЗ₁₂ по классификации АСЕА на основе высокощелочных беззольных сукцинимидных присадок. Приведены результаты аналитического контроля моторных масел, полученных на основе модифицированных пакетов присадок, содержащих синтезированные сукцинимидные присадки.

Ключевые слова: нефтехимическая промышленность, аминирование алкенилэтантарного ангидрида, высокощелочные сукцинимидные присадки, малозольное моторное масло, классификация АСЕА.

Современное машиностроение развивается бурными темпами. Согласно исследованию, проведенному компанией Wards Auto в 2010 году, общее количество автотранспортных средств превысило 1 миллиард. По прогнозу независимого аналитического агентства экономического развития Global Insight, к 2035 году мировой автопарк достигнет 3 миллиардов автомобилей.

Учитывая, что при эксплуатации автомобилей (сгорании топлива) выделяется большое количество вредных, загрязняющих атмосферу веществ, эта проблема привлекает пристальное внимание экологов. В 1966 году в США были приняты первые в мире ограничения концентрации вредных выбросов в выхлопе. В Европе первое регулирование появилось в 1972 году, в 1988-м был разработан экологический стандарт Евро-0, который развивается и совершенствуется, подтверждение тому – принятый в 2015 году стандарт Евро-6.

Для выполнения более жестких норм содержания токсичных веществ в отработанных газах стали применять выпускную систему, включающую в себя сажевый фильтр (Particulate Filter – англ.). При попадании в фильтр зола, образовавшаяся при разложении и окислении присадок, оседает и накапливается в нем, что существенно уменьшает срок эксплуатации сажевого фильтра. По этой причине перспективным направлением совершенствования качества моторных масел является разработка моторных масел low SAPS (Sulphated Ash, Phosphorus and Sulphur – англ.) с улучшенными химмотологическими свойствами [1; 2]. Моторное масло с характеристикой low SAPS является маслом, содержащим в минимальном количестве сульфатную золу, фосфор и серу [3; 4].

Один из способов решения данной проблемы – расширение функционального действия беззольных дисперсантов – позволяет уменьшить вовлечение зольных присадок в компонентный состав товарного масла [5; 6].

На базе предприятия СООО «ЛЛК-НАФТАН» проведен синтез модифицированных сукцинимидных присадок с последующим компаундированием моторного масла, соответствующего категории СЗ₁₂ по классификации АСЕА.

Основная часть. Цель настоящей работы – синтез и исследование свойств высокощелочной сукцинимидной присадки С-1100 на основе синтеза присадки С5-А, а также синтез высокощелочной борированной сукцинимидной присадки С-1100Б на основе синтеза присадки С5-АБ; создание пакета присадок, позволяющего получить моторное масло, соответствующее категории СЗ₁₂ по классификации АСЕА.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- синтезировать высокощелочную сукцинимидную присадку С-1100 путем взаимодействия алкенилэтантарного ангидрида с полиаминами различного строения;
- провести борирование синтезированной присадки С-1100 и изучить химмотологические характеристики синтезированной высокощелочной борированной присадки;
- подобрать базовую основу, позволяющую при внесении модифицированного пакета присадок получить моторное масло, соответствующее категории СЗ₁₂ классификации АСЕА и классу 5W-40 по классификации SAE J300;
- всесторонне изучить функциональные свойства полученного моторного масла и сравнить его характеристики с моторным маслом, получаемым на основе пакета присадок РА-4501.

Первый этап исследования – получение высокощелочной сукцинимидной присадки путем взаимодействия алкенилэтантарного ангидрида с полиаминами различного строения.

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики сукцинимидной присадки С-1100 на полиаминах различного строения

Показатель	Полиамин				Метод испытания
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
Кислотное число, мг КОН/г	1,16	1,12	0,94	1,84	Методика ЛЛК-НАФТАН
Щелочное число, мг КОН/г	40,27	45,65	84,39	81,9	ГОСТ 11362-96
Массовая доля азота, %	1,62	1,89	3,51	3,44	п. 5.7 ТУ ВУ 390401182.028-2012
Массовая доля свободных полиаминов, %	0,08	0,12	0,35	0,24	п. 5.6 ТУ 38.101146-77
Массовая доля воды, %	0,06	0,06	0,06	0,06	ГОСТ 2477-65
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	–	–	196,9	230	ГОСТ 33-2000

Согласно предварительному расчету, щелочное число полученной присадки не должно быть ниже 75 мг КОН/г. Результаты анализа показали, что только присадка, полученная на основе полиаминов № 3 и № 4, может быть использована для дальнейшего борирования и компаундирования пакета присадок.

Следующий этап исследования – борирование синтезированной присадки С-1100 на полиаминах № 3 и № 4. Результаты синтеза приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристика сукцинимидной борированной присадки С-1100Б на полиаминах № 3 и № 4

Показатель	Полиамин	
	№ 3	№ 4
Щелочное число, мг КОН/г	81,26	79,15
Массовая доля азота, %	3,42	3,37
Массовая доля бора, %	1,78	1,91
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	286,7	378,7

Из таблицы видно, что присадки С-1100 на полиаминах № 3 и № 4 имеют близкие физико-химические свойства, поэтому решающим фактором при выборе присадки для компаундирования пакета присадок стал экономический. Смесь тяжелых полиаминов (полиамин № 4), в отличие от полиамина № 3, является остатком четкой разгонки полиаминов, то есть побочным продуктом с нерегулярным составом, что значительно снижает его стоимость.

Результаты проведенного сравнения основных показателей присадок С5-А, С5-АБ и их модифицированных аналогов представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Основные показатели присадок

Показатель	Единица измерения	С5-А	С-1100	С5-АБ	С-1100Б
Щелочное число	мг КОН/г	25	82	23	79
Содержание азота	% масс.	1,4	3,5	1,3	3,4
Содержание свободных полиаминов	% масс.	0,27	0,24	0,11	0,08
Вязкость кинематическая при 100 °С	мм ² /с	224	230	342	379
Содержание бора	% масс.	–	–	1	1,9

Анализ основных показателей присадок С5-А, С5-АВ и их модифицированных аналогов позволил установить следующие зависимости:

- 1) увеличение щелочного числа происходит вследствие увеличения содержания азота в присадке;
- 2) содержание свободных полиаминов уменьшается из-за более длительной выдержки присадки на стадии аминирования при высокой температуре, что необходимо для полноты реакции;
- 3) содержание бора в борированном продукте увеличивается пропорционально азоту;
- 4) увеличение вязкости при борировании происходит резко, нелинейно, из-за склонности бора образовывать комплексные соединения, что затрудняет получение сукцинимидной присадки с высоким содержанием бора на производстве.

Синтезированные присадки С-1100 и С-1100Б на основе полиамина № 4 использовались для получения пакетов присадок РА-4501МА и РА-4501МБ.

Пакет присадок РА-4501МА содержит в своем составе только неборированную сукцинимидную присадку С-1100, в то время как в пакете РА-4501МБ содержится часть присадки С-1100 и часть С-1100Б. Следовательно, этот пакет обладает усиленными антикоррозионными и противозносными свойствами.

Следующий шаг – выбор и компаундирование базовой основы для получения моторного масла на основе пакетов РА-4501МА, РА-4501МБ и оригинального пакета РА-4501 с целью сравнения эксплуатационных характеристик.

В состав базовой основы вовлекаются четыре компонента: два высококачественных базовых масла; загуститель (присадка, улучшающая вязкостно-температурные свойства, т.е. повышающая индекс вязкости); депрессорная присадка. Состав базовой основы приведен в таблице 4.

Таблица 4. – Состав базовой основы моторного масла

Компонент	% масс.
10%-ный раствор загустителя в SN-150	19
Депрессорная присадка	0,2
Базовое масло VHVI	40
Базовое масло SN-150	40,8
Итого:	100

Данный состав базовой основы был выбран для получения моторного масла, соответствующего классу 5W-40 по классификации SAE J300.

В соответствии с целью исследования и поставленными задачами на выбранной базовой основе получены моторные масла с вовлечением пакетов присадок РА-4501М и РА-4501. Результаты компаундирования приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Сравнение характеристик моторных масел на основе пакетов присадок РА-4501 и РА-4501МА

Показатель	Единица измерения	Масло 4501	Масло 4501-МА	Требования
Щелочное число	мг КОН/г	9,63	10,47	$\geq 6,0$
Зольность сульфатная	% масс.	1,29	0,92	$\leq 0,8$
Содержание фосфора	% масс.	0,1152	0,0949	$\geq 0,070 \leq 0,090$
Содержание серы	% масс.	0,4327	0,4027	$\leq 0,3$
Время окисления на PDSC	мин	22,08	16,31	–

Исходя из результатов, приведенных в таблице 5, делаем вывод: масло 4501-МА не соответствует требованиям по содержанию сульфатной золы (0,92% вместо 0,8%), также не проходит по содержанию серы и фосфора (0,4 и 0,0949% при необходимых 0,3% и 0,07...0,09% соответственно). Кроме того снизилось время окисления моторного масла, измеряемое с помощью дифференциального сканирующего калориметра (PDSC) с 22,08 до 16,31 мин, то есть ухудшилась термостабильность масла.

С учетом полученных данных были компаундированы пакеты присадок для масел 4501М 2А и 4501М 2Б. Для уменьшения сульфатной зольности масла вовлечение высокощелочной сульфатной присадки уменьшено и пропорционально увеличено содержание нейтральной сульфатной присадки.

Сравнительная характеристика моторных масел, полученных на основе пакетов присадок PA-4501M 2A и PA-4501M 2B, приведена в таблице 6.

Таблица 6. – Сравнение характеристик моторных масел на основе пакетов присадок PA-4501M 2A и PA-4501M 2B

Показатель	Единица измерения	Масло 4501M 2A	Масло 4501M 2B	Требования
Щелочное число	мг КОН/г	9,34	9,84	$\geq 6,0$
Зольность сульфатная	% масс.	0,86	0,87	$\leq 0,8$
Содержание фосфора	% масс.	0,1009	0,0981	$\geq 0,070 \leq 0,090$
Содержание серы	% масс.	0,4217	0,4107	$\leq 0,3$
Время окисления на PDSC	мин	16,10	–	–

На основании данных, приведенных в таблице 6, можно заметить, что уменьшение зольности масла было недостаточным (содержание сульфатной золы превышает 0,8% масс.), в то время как уменьшение содержания высокощелочной сульфатной присадки привело к незначительному уменьшению щелочного числа и времени окисления на PDSC.

Состав пакетов присадок PA-4501M 3A и PA-4501M 3B разработан с учетом предыдущих результатов. Содержание высокощелочного сульфоната повторно было снижено. Содержание нейтрального сульфоната осталось без изменений; Для улучшения высокотемпературных свойств увеличено содержание аминного антиокислителя и уменьшено вовлечения дитиофосфатной присадки для снижения содержания фосфора в масле.

Сравнительная характеристика моторных масел, полученных на основе пакетов присадок PA-4501M 3A и PA-4501M 3B, приведена в таблице 7.

Таблица 7. – Сравнение характеристик моторных масел на основе пакетов присадок PA-4501M 3A и PA-4501M 3B

Показатель	Единица измерения	Масло 4501M 3A	Масло 4501M 3B	Требования
Щелочное число	мг КОН/г	6,76	7,44	$\geq 6,0$
Зольность сульфатная	% масс.	0,67	0,72	$\leq 0,8$
Содержание фосфора	% масс.	0,0861	0,087	$\geq 0,070 \leq 0,090$
Содержание серы	% масс.	0,3946	0,4027	$\leq 0,3$
Время окисления на PDSC	мин	20,92	31,76	–
Вязкость динамическая CCS при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	мПа·с	6320	6160	≤ 6600
Вязкость динамическая MRV при $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$	мПа·с	32100	33500	≤ 60000
Вязкость кинематическая, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$	мм ² /с	12,91	12,78	$\geq 12,5$

На основании данных, приведенных в таблице 7, установлено, что имеет место снижение щелочного числа, однако его показатели остались в требуемом интервале ($\geq 6,0$ мг КОН/г). Сульфатная зольность понизилась до необходимого уровня ($\leq 0,8\%$ масс.). Содержание фосфора находится в диапазоне (0,07...0,09% масс.). Время окисления масла PA-4501M 3A на PDSC увеличилось на 23% (с 16,10 до 20,92 мин) по сравнению с предыдущим образцом. Время окисления масла 4501M 3B составило 31,76 мин, что на 52% больше модифицированного моторного масла с неборированным сукцинимидом.

По результатам анализа вязкостно-температурных характеристик масел 4501M 3A и 4501M 3B установлено, что они соответствуют классу SAE 5W-40.

Следует отметить, что содержание серы в моторном масле не изменялось при изменении состава пакетов присадок, так как источниками серы в пакете присадок являются: сульфонаты, дитиофосфаты, осерненный алкилфенолят.

Однако в настоящее время необходимо вовлечение данных присадок в моторное масло, поскольку сульфонаты и алкилфеноляты улучшают термическую стабильность масла, моющие функции, а также частично отвечают за нейтрализующую способность масла, при уменьшении их содержания понизится

щелочное число масла, ухудшатся противоизносные свойства, заметно увеличатся лако- и нагарообразования в зоне высоких температур в двигателе.

Дитиофосфаты отвечают за противоизносные свойства, но главным образом за антиокислительные свойства масла. При уменьшении их содержания значительно снизится время окисления моторного масла на PDSC. Дитиофосфаты являются самыми дешевыми антиокислителями, что также затрудняет их замену на антиокислители другого вида (аминный или фенольный).

Заключение. Для получения присадки С-1100 наиболее эффективным аминирующим агентом оказалась смесь тяжелых полиаминов – полиамин № 4, с помощью которого получена присадка со щелочным числом более 80 мг КОН/г и содержанием азота 3,3% масс.

На стадии борирования получена присадка С-1100Б, содержащая 1,9% бора, что на 0,9% больше, чем у используемой присадки С-5АБ.

Полученные моторные масла 4501М 3А и 4501М 3Б соответствуют классу 5W-40 по классификации SAE J300, а также соответствуют большинству лабораторных показателей категории С3₁₂ по классификации ACEA за исключением содержания серы.

Наиболее эффективные способы достижения этой цели – частичное или полное замещение сульфонатных присадок на алкилсалицилатные, а также замена компонента базовой основы (базового масла SN-150) на базовое масло II и III группы по классификации API.

Синтезированные беззольные сукцинимидные присадки С-1100 и С-1100Б могут использоваться не только в качестве компонентов пакетов присадок, но и как самостоятельные продукты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Use of a novel non-phosphorus antiwear additive for engine oils / U. Kristen [et al.] // SAE Tech. Pap. Ser. – 1987. – № 872080. – P. 10.
2. Чертков, Я.Б. // Нефтепереработка и нефтехимия / Я.Б. Чертков, А.Б. Виппер. – Киев : Наук. думка. – 1993. – Вып. 45. – С. 19.
3. Hackländer, A. Typical limit values for motor oils from diesel engines (stationary or non-stationary) / Astrid Hackländer // Öl Checker. – 2010. – Spring. – P. 8.
4. Lubricant Additives Chemistry and Applications Second Edition ; Edited by Leslie R. Rudnick / Designed Materials Group Wilmington, Delaware, USA.
5. Синтез высоковязких поли- α -олефинов и освоение промышленного производства масла ПАОМ-20 / О.Н. Цветков [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – М. : Издат. центр «Техинформ» МАИ. – 2014. – № 3. – С. 26.
6. Оценка эффективности действия сукцинимидных присадок к моторным маслам / А.Л. Чудиновских [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – М. : Издат. центр «Техинформ» МАИ. – 2013. – № 6. – С. 13.

Поступила 21.07.2017

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF HIGH-QUALITY ABSOLUTELY SUFFICIENT SUKCCINIMIDE ADDITIVES FOR THE LOW-SAPS MOTOR OILS PRODUCTION

A. FAKEYEU, S. POKROVSKAYA, I. BURAYA, K. ANTUH, D. NIKOLIN

The synthesis of a highly alkaline succinimide additive based on polyamines of various structures is studied. The possibility of obtaining low-ash motor oil of category C3-12 according to the classification of ACEA (Association of European Automobile Manufacturers) on the basis of high alkaline ashless succinimide additives is considered. The article presents the results of analytical control of motor oils obtained on the basis of modified additive packages containing synthesized succinimide additives.

Keywords: petrochemical industry, aminating of alkenyl succinic anhydride, high-alkali succinimide additives, low-ash engine oil, ASEA classif.

УДК 547.4+547.7+674.02+676.2

ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

канд. техн. наук, доц. М.О. ШЕВЧУК;
д-р хим. наук, проф. В.С. БЕЗБОРОДОВ; канд. техн. наук Е.П. ШИШАКОВ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск);
д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);
канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются проблемы и достижения переработки растительного сырья. Обобщены результаты работы авторов по переработке растительной биомассы в ценные продукты, полупродукты и материалы: фурфурол, фурфуроловый спирт, кормовой белок, уксусную кислоту, этанол, микрокристаллическую целлюлозу, органосольвентную целлюлозу, вискозный корд, целлолигнин, оксидаты целлолигинина (стимуляторы роста растений), γ -аминомасляную кислоту, γ -гидроксимасляную кислоту.

Ключевые слова: *растительное сырье, растительная биомасса, фурфурол, целлюлоза, лигнин, стимуляторы роста растений.*

Введение. В настоящее время объемы добычи и переработки нефти превысили 4,4 млрд т в год [1]. Цены на нефть в последние два десятилетия растут (хотя и с существенными колебаниями), поэтому для своего устойчивого развития человечество должно разработать технологии получения органических веществ и продуктов как альтернативу нефтехимии. В связи с обозначенной проблемой активно ведутся исследовательские работы по использованию других видов ископаемого углеродсодержащего сырья: каменного и бурого углей (получения жидких углеводородных топлив), торфа (полисорбентов), горючих сланцев [2–4], а также возобновляемых источников сырья: древесины, сельхозотходов растительного и животного происхождения, водорослей, которых образуется 150 млрд т в год [5–7].

Наибольший практический интерес для Беларуси, на наш взгляд, представляет переработка растительной биомассы – древесины, сельхозотходов, поскольку они являются возобновляемым сырьем, из которого можно получить ценные продукты, полупродукты и материалы [5–7].

Основная часть. Сухая растительная биомасса однолетних и многолетних растений на 25...50% состоит из целлюлозы, 15...30% из лигнина, 5...25% из гемицеллюлозы. Целлюлоза – самый распространенный природный полимер, абсолютная масса которого значительно превышает количество любого другого органического вещества. Она является важным сырьем для химической переработки, на основе которого можно получать различные технически ценные и во многих случаях незаменимые продукты и материалы [8 с. 5; 9–12].

Путем действия органических или минеральных кислот, солевых катализаторов при повышенной температуре полисахариды растительного сырья гидролизуются до моносахаридов, которые в дальнейшем могут быть переработаны микробиологическим путем в кормовой белок, этанол, глицерин, молочную кислоту и другие вещества и продукты [12–16].

Ниже приведена схема, показывающая, какие вещества и продукты могут быть получены из растительного сырья (рисунок 1).

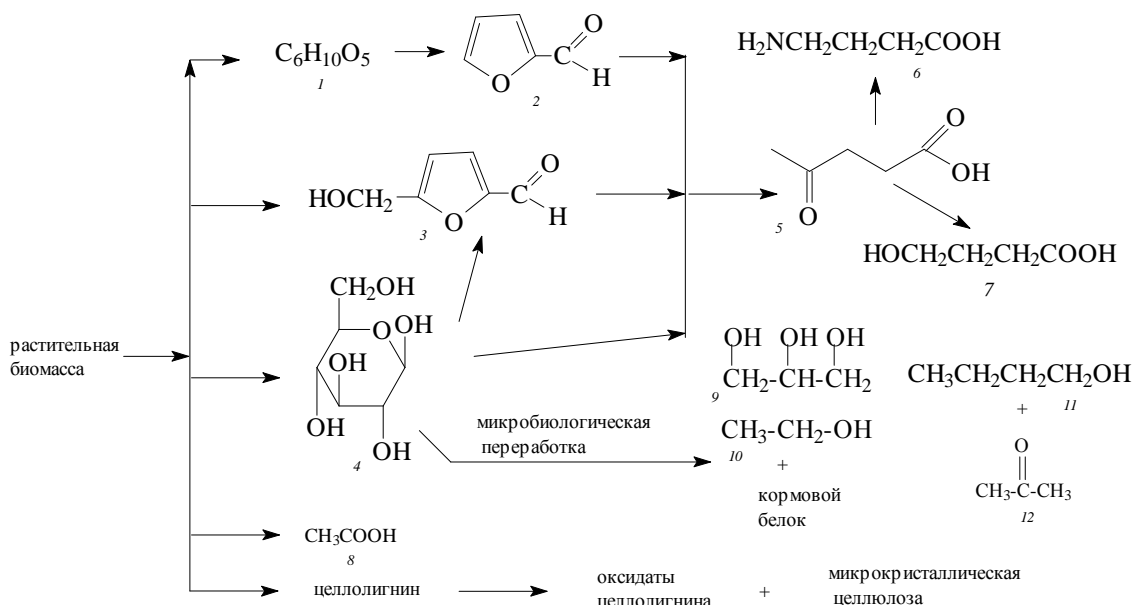
В Белорусском государственном технологическом университете (БТИ), который известен школой получения фурфурола, разработаны различные технологии его получения. По одной из них совместно можно получить фурфурол и кормовой белок [17].

На *первой стадии* из гемицеллюлоз парофазным гидролизом с использованием соляных катализаторов получают фурфурол; на второй стадии целлолигнинный остаток подвергают жидкофазному гидролизу в присутствии 0,3...0,7%-ного раствора серной кислоты [18].

На гидролизате, полученном на *второй стадии процесса*, содержащем 2...3% моносахаров, выращивают дрожжи *Candida tropicalis* и *Candida scotti*. По предложенной технологии из 1 т абсолютно сухой березовой щепы получается 60...70 кг фурфурола, 80...90 кг кормовых дрожжей (39...44 кг истинного белка) [19–20]. Технология внедрена на Мантуровском гидролизном биохимическом заводе (Россия, Костромская обл., г. Мантурово).

По второй разработанной технологии фурфурол получают с использованием комплексных катализаторов (смеси органических и минеральных кислот). Для приготовления комплексного катализатора предложено применять отходы фурфурольного производства – фурфурольный лютер (водный

1,2%-ный раствор уксусной кислоты), в который в необходимом количестве добавляется концентрированная серная кислота [21; 22].



1 – пентоза (ксилоза); 2 – фурфурол; 3–4-гидроксибутионовая кислота; 4 – глюкоза; 5 – левулиновая кислота; 6 – γ -аминоасляная кислота (4-гидроксибутановая); 7 – γ -гидроксиасляная (4-аминобутановая) кислота; 8 – уксусная кислота; 9 – глицерин; 10 – этанол; 11 – бутанол; 12 – ацетон

Рисунок 1. – Схема переработки растительной биомассы путем гидролиза

Схема разработанного технологического процесса представлена на рисунке 2. Данная технология внедрена на РУП «Речицкий опытно-промышленный гидролизный завод». Проведенные промышленные испытания позволили установить, что выход фурфурола из отходов фанерного производства при применении раствора комплексного катализатора увеличился на 20% по сравнению с действовавшей на предприятии технологией. Фурфурольный лютер содержит 1,5...2,0% уксусной кислоты, образующейся при повышенных температурах при деацетилировании растительной ткани [23]; может быть использован для получения товарных продуктов: уксусной кислоты, ацетата кальция и др.

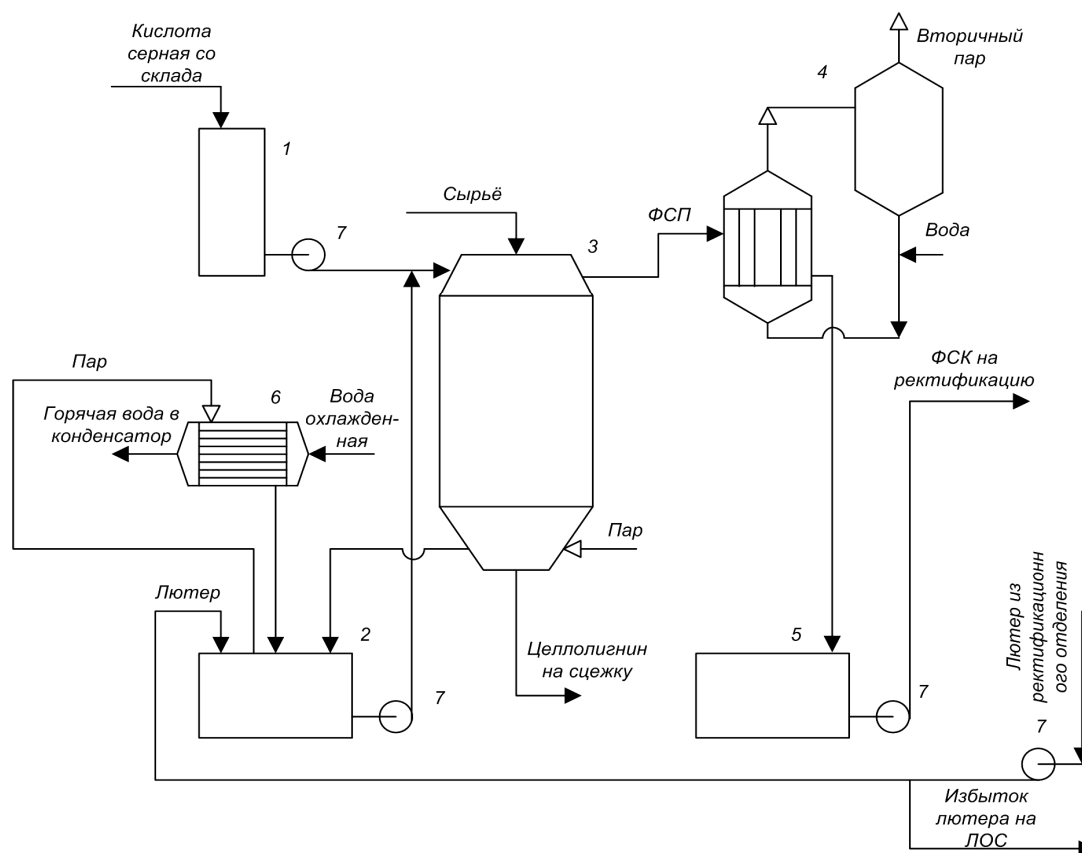
Изучена возможность получения фурфурилового спирта из фурфурола перекрестной реакцией Каннищаро с формальдегидом [24]. Максимальный выход фурфурилового спирта достигал 75% от теоретически возможного. Как побочный продукт образуется формиат натрия, из которого может быть получена муравьиная кислота, используемая в ряде производств.

Фурфуриловый спирт находит широкое применение в технологии получения связующих в машиностроении и деревообработке. С его использованием авторами разработана рецептура смол для холоднотвердеющих смесей [25], «горячих ящиков» [26], амин процесса [27], горячеплакированных смесей [28]. С использованием фурфурилового спирта можно получать высококачественные водостойкие смолы для изготовления древесностружечных плит [29; 30], фанеры [31; 32], при изготовлении мебели [33]. Полученные авторами новые смолы прошли промышленные испытания, по результатам которых сделаны выводы о пригодности их для изготовления стержней и отливок в цехе алюминиевого литья ОАО «Минский моторный завод».

Гидролизное производство характеризуется значительным количеством твердых отходов: лигнина и целлюлозигнина, которые утилизируются сжиганием. Предложено использовать лигнин, являющийся отходом гидролизного производства, в качестве сырья для получения стимулятора роста растений [34; 35]. Авторами предложено также из целлюлозигнина фурфурольных варок получать стимулятор роста растений [35; 36]. Разработан режим получения стимулятор роста растений (оксидат лигнина).

Исследования показали, что оксидат лигнина представляет собой сложную смесь низкомолекулярных веществ, преимущественно кислого характера. Суммарное содержание этих веществ составляет 20...25% от массы сухих веществ оксидатов. Основную часть оксидатов (75...80% сухих веществ) составляют нелетучие поликарбонные кислоты.

В результате реакции получают два основных продукта: водорастворимый оксидат лигнина и твердый полисахаридный остаток (микрористаллическая целлюлоза), выходы этих продуктов составляют соответственно 30...35 и 40...50% от массы абсолютно сухого сырья (а.с.с.) – целлюлозы.



**1 – мерник серной кислоты; 2 – сборник лютера; 3 – гидролизатор;
4 – паропреобразователь; 5 – сборник фурфуролсодержащего конденсата (ФСК);
6 – теплообменник; 7 – центробежный насос; 8 – расходомер; 9 – плунжерный насос**

Рисунок 2. – Схема разработанного технологического процесса получения фурфурола с использованием комплексных катализаторов

Оценка действия калиево-аммонийных солей оксидатов на ряде лесных культур показала, что полученные оксидаты обладают росторегулирующими свойствами. Всхожесть семян ряда сельскохозяйственных, декоративных и лесных культур под действием растворов солей оксидантов повышается на 25...31%, энергия прорастания – в 1,18...1,58 раза [34–38].

При повышенных температурах под действием кислотных катализаторов происходит разложение пентозанов в фурфурол и далее в леволиновую (4-оксопентановую) кислоту (ЛК). Гексозаны в этих условиях последовательно трансформируются в гексозы, 5-гидрокси-метилфурфурол и в конечном итоге в ЛК [39]. Таким образом, вся холлоцеллюлоза древесины (70...75% от массы а.с.с.) может быть трансформирована в ЛК – ценное сырьё для химической промышленности. Из нее могут быть получены эфиры и соли ЛК, которые применяют в пищевой промышленности в качестве консервантов, при производстве косметики – как стабилизаторы и отдушки, эфиры гликолей являются пластификаторами [7].

Соединения, синтезированные на основе ЛК (рисунок 3), применяют как ингибиторы коррозии, инициаторы радикальной полимеризации, сшивающие агенты, входят в состав жидких кристаллов, используются как антифризы [7; 39]. Леволиновая кислота доступна, поэтому методы синтеза соединений, получаемых на ее основе, легко конкурируют с другими синтетическими подходами.

Для ЛК возможны превращения обеих функциональных групп, вследствие этого из нее можно получить различные гетероциклы (производные пирролидона, индола, хромона) [39].

Учитывая доступность леволиновой кислоты, в процессе исследований вариантов ее модификации нами были разработаны *альтернативные способы получения γ -аминомасляной и γ -гидроксимасляной кислот* из [40–42].

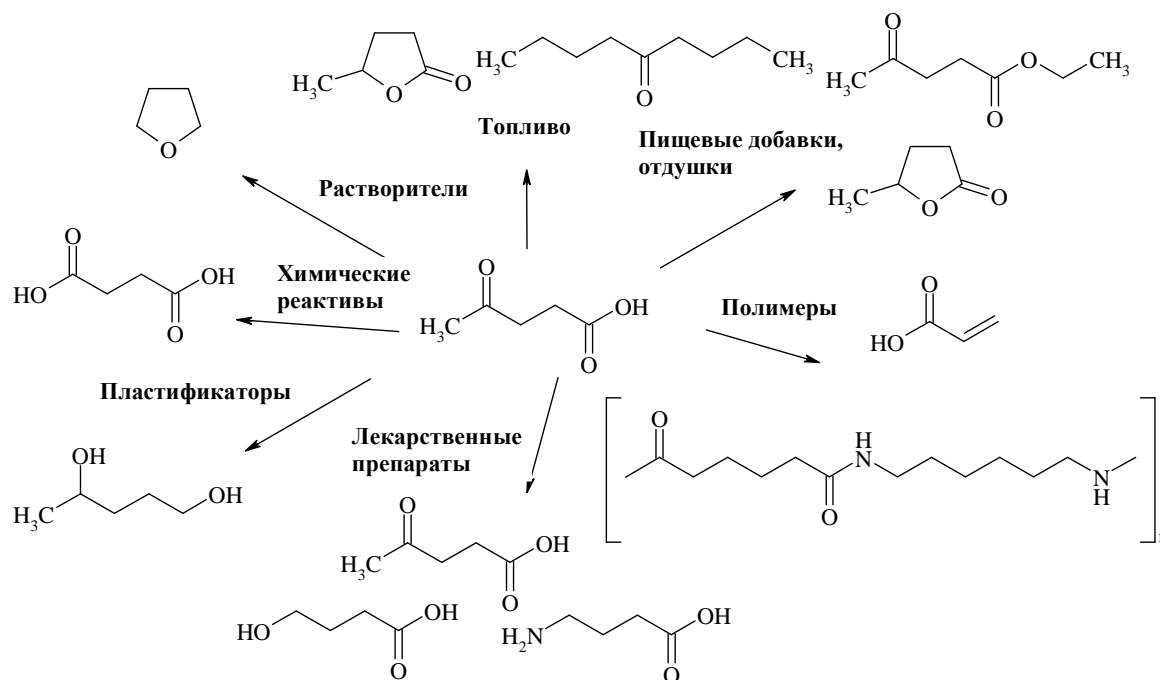
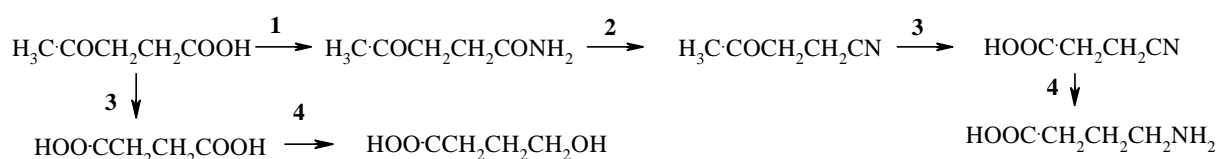


Рисунок 3. – Соединения, синтезируемые на основе левулиновой кислоты



1. $(\text{COCl})_2$, NH_4OH ; 2. $-\text{H}_2\text{O}$; 3. O_2 , V_2O_5 , 4. H_2 , Pd/C .

Аминированием, дегидратацией амида 4-оксопентановой кислоты, затем гидрированием нитрила 4-оксопентановой кислоты на 10% Pd/C и окислением ацетильного фрагмента кислородом в присутствии V_2O_5 получали γ -аминомасляную кислоту, а окислением ацетильного фрагмента кислородом в присутствии V_2O_5 и гидрированием образующейся янтарной кислоты 10% Pd/C или восстановлением ее борогидридом цинка синтезировали γ -гидроксимасляную кислоту.

Производственная деятельность предприятий лесного и химико-лесного комплекса сопровождается накоплением значительно числа твердых отходов – древесных опилок, коры и гидролизного лигнина. Одним из возможных решений данной проблемы является переработка этих отходов в гумусосодержащие вещества [43–51]. Исследования влияния на процесс гумификации влажности сырья, содержания в нем солей азотной и фосфорной кислот позволили установить оптимальные условия процесса гумификации. Использование активного ила, принудительной аэрации и микроэлементов позволили значительно интенсифицировать процесс образования гумусовых веществ. Наиболее медленная конверсия наблюдалась у опилок ели и осины, наиболее быстра у гидролизного лигнина и коры.

Опытно-промышленные испытания органоминеральных удобрений, полученных из лигнина и древесных отходов, на таких культурах, как томаты, розы, сеянцы сосны, показали, что по многим показателям полученные удобрения превосходят традиционное гумусное удобрение – торф. Установлено, что наиболее целесообразно их внесение на тяжелых почвах [43–51].

Проблемы экологии, связанные с получением целлюлозы с применением серосодержащих реагентов (сульфитная и сульфатная варка) требуют принципиального переосмысления способов делигнификации. Авторами разработаны различные варианты способов получения целлюлозы с использованием органических растворителей – водных растворов уксусной и надуксусной кислот [52–56]. Процесс получения целлюлозы с использованием надуксусной кислоты протекает в одну стадию при температурах до $100\text{ }^\circ\text{C}$ и не требует отбелики. Выход такой целлюлозы составляет 53...60% от массы а. с. древесины, при белизне около 80%. Механическая прочность бумаги, полученной из этой целлюлозы, (разрывная длина) составляет 9900...10300 м, сопротивление излому выше 2000 двойных перегибов, тангенс диэлектрических потерь 0,00360 при $200\text{ }^\circ\text{C}$. В ходе дальнейшего совершенствования процесса был предложен принципиально новый двухстадийный способ делигнификации. При варочном модуле 1:1 до 0,1:1 была проведена парогазовая деструкция лигнина, а затем его экстракция 2% раствором гидроксида натрия при

температуре 50 °С. При этом несмотря на снижение выхода целлюлозы, потребительские свойства конечного продукта упали лишь в среднем на 5...7%.

Обнаружено, новое свойство уксусно-перекисной целлюлозы – способность давать фотоизображение в отсутствии солей серебра.

Показано, что производство целлюлозы можно осуществлять с использованием 75% уксусной кислоты при температуре варки 150...170°С. Полученная целлюлоза имела стандартный выход для органо-сольвентной варки 47...51% от массы а. с. древесины и содержала от 1 до 3% лигнина. В процессе варки в качестве побочного продукта был получен так называемый уксуснокислый лигнин, который с успехом заменял до 50% фенола, при производстве фенолформальдегидных смол. Смолы, полученные с использованием уксуснокислого лигнина, имели значительно меньшую токсичность, чем стандартная фенолформальдегидная смола. Кроме того, уксуснокислый лигнин усиливал проклейку небеленой бумажной массы, являлся антиоксидантом в рецептуре резин. Лигноуглеводный комплекс на его основе проявлял аниткоагулянтные свойства для крови [52–56].

Комплекс свойств, характеризующих целлюлозу, даже на современном этапе имеет в значительной степени неиспользованный потенциал, позволяющий создавать модифицированные материалы с улучшенными свойствами и более широким спектром практического использования. К таким свойствам относятся анизотропия, присущая целлюлозе и большинству биополимеров, и образование в определенных условиях жидкокристаллических фаз, характеризующихся высокой упорядоченностью молекул друг относительно друга. Основные исследования анизотропных свойств целлюлозы проводились ранее преимущественно с использованием химически модифицированных или реструктурированных препаратов.

Среди потенциальных материалов, которые могут быть получены с использованием анизотропных свойств целлюлозы, следует отметить:

- легкие и прочные композитные материалы (нити, пленки, бронежилеты и т.д.);
- гибкие экраны;
- эффективные фильтры;
- ультраабсорбирующие гели;
- лекарственные препараты нового поколения и эффективны материалы для медицины.

Разработки модифицированной целлюлозы нового поколения позволят в будущем получать продукцию с высокой добавочной стоимостью.

Авторами разработан новый подход к созданию наноразмерных композиционных материалов для оптоэлектроники, который базируется на использовании функционализации участвующих в реакции компонентов при конструировании анизотропной молекулы с сохранением хиральности природного субстрата ((-)-этил L лактата) [57].

В настоящий момент завершено строительство первого в Беларуси завода по производству беленой сульфатной целлюлозы (г. Светлогорск). В качестве побочного продукта при получении целлюлозы образуется сульфатное мыло (смесь натриевых солей жирных и смоляных кислот), в переработке которого заинтересовано ОАО «Борисовский «Лесохимик» сульфатного мыла, что ставит перед белорусскими учеными и производственными работниками новые задачи по рациональному и комплексному использованию растительного сырья.

Выводы. Из растительной биомассы на базе имеющегося на белорусских предприятиях основного оборудования и технологий могут быть получены ценные продукты, полупродукты и материалы: беленая целлюлоза, микрокристаллическая целлюлоза, вязкая кордная нить, фурфурол, фурфуриловый спирт, кормовой белок, уксусная кислота, этанол, целлолигнин, органоминеральные удобрения, стимуляторы роста растений (оксидаты целлолигнина), леулиновая кислота, γ -аминомасляная кислота, γ -гидроксимасляная кислота, качественно новые материалы, созданные с использованием анизотропных свойств целлюлозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Список стран по добыче нефти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. – Дата доступа: 11.08.2017.
2. Гуминовые препараты бурого угля, торфа и методы их деминерализации / И.И. Лиштван [и др.] // Химия твердого топлива. – 2013. – № 3. – С. 147–152.
3. Лиштван, И.И. Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов / И.И. Лиштван, А.К. Карабанов // Природопользование. – 2014. – Вып. 26. – С. 237–240.
4. Пиролиз смесевых составов на основе горючего сланца и бурого угля Беларуси и характеристика получаемых продуктов / И.И. Лиштван [и др.] // Химия твердого топлива. – 2014. – № 2. – С. 3–7.

5. Шевчук, М.О. Пентозансодержащее сырье и анализ сырьевой базы для производства фурфурола в Республике Беларусь / М.О. Шевчук // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орг. в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 170–172.
6. Болтовский, В.С. Комплексная гидролитическая переработка пентозансодержащей растительной биомассы с получением фурфурола и белоксодержащей кормовой добавки / В.С. Болтовский // Химия растительного сырья. – 2014. – № 2. – С. 5–12.
7. Rackemann, D.W. The conversion of lignocellulosics to levulinic acid / D.W. Rackemann, W.O.S. Doherty // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. – 2011. – 5(2). – P. 115–126.
8. Методы исследования целлюлозы / В.П. Карливан [и др.] ; под общ. ред. В.П. Карливана. – Рига : Зинатне, 1981. – 264 с.
9. Шевчук, М.О. / Исследование молекулярно-массового распределения некоторых видов целлюлозы / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков, В.Н. Докучаев // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия, технология орг. в-в. и биотехнология. – 2009. – Вып. XVII. С. 247–250.
10. Шевчук, М.О. / Молекулярно-массовое распределение некоторых видов целлюлоз / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков, М.А. Зильберглейт // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 нояб. 2008 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – С. 75–77.
11. Шевчук, М.О. Рентгеноструктурный анализ сульфатных целлюлоз различных производителей / М.О. Шевчук, М. А. Зильберглейт, Е.П. Шишаков // Химия растительного сырья. – 2013. – № 3. – С. 43–47.
12. Способ получения питательного субстрата для выращивания кормовых дрожжей : а. с. SU 1125244 / Е.Ф. Морозов, В.М. Шкут, М.С. Кебич, Е.П. Шишаков. – Оpubл. 1984.
13. Получение фурфурола двухфазным гидролизом лиственной древесины с применением монокальций фосфата / В. И. Коломеец [и др.] // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1984. – № 6. – С. 26–28.
14. Способ получения фурфурола и кормовых дрожжей : а. с. SU 1330155 / Е.Ф. Морозов, Е.П. Шишаков, В.М. Шкут, Н.С. Ручай, М.С. Кебич, В.И. Коломеец, П.И. Самсонов. – Оpubл. 15.08.87.
15. Влияние катализаторов фурфурольной стадии двухфазного гидролиза на качество гидролизатов / Е.Ф. Морозов [и др.] // Химия и химическая технология. – 1988. – Вып. 2. – С. 76–79.
16. Шевчук, М.О. Кинетика парофазного гидролиза растительного сырья в автокаталитическом процессе / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков, М.А. Зильберглейт // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 91–93.
17. Способ получения фурфурола и кормовых дрожжей : а. с. SU 1507789 / Е.Ф. Морозов, В.М. Шкут, М.С. Кебич, Е.П. Шишаков. – Оpubл. 15.08.1987.
18. Повышение качества гидролизатов древесины внесением комплексных солей на стадии инверсии / В.М. Шкут [и др.] // *Лесной журнал*. – 1990. – № 2. – С. 104–107.
19. Способ перколяционного гидролиза растительного сырья : а. с. SU 1606538 / В.М. Шкут, О.М. Шевчук, А.Н. Турок, Е.П. Шишаков. – Оpubл. 1990.
20. Влияние азотнокислых и комплексных солей на состав дрожжевой биомассы / В.М. Шкут [и др.] // *Лесной журнал*. – 1991. – № 2. – С. 94–97.
21. Способ получения фурфурола : пат. ВУ 12693 / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков. – Оpubл. 2009.
22. Шишаков, Е.П. Переработка отходов сельскохозяйственного производства с получением кормовых продуктов и строительных материалов и химической продукции / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, О.Ю. Рекиш // *Инновационные разработки молодых ученых – развитию агропромышленного комплекса* : сб. науч. тр. II Междунар. конф. ; ГНУ СНИИЖК. – Ставрополь, 2013. – Т. 3, вып. 6 – С. 302–305.
23. Шевчук, М.О. Динамика образования уксусной кислоты в результате парофазной обработки растительного сырья / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков, М.А. Зильберглейт // Труды БГТУ. Сер., IV. Химия и технология орг. в-в. – 2007. – Вып. XV. – С. 28–31.
24. Шишаков, Е.П. Переработка лиственной древесины с получением фурфурола, фурфурилового спирта и фурановых смол / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук // *Альтернативные источники сырья и топлива* : тез. докл. II междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 мая 2009 г. – Минск, 2009. – С. 43.
25. Способ получения связующего для изготовления литейных форм и стержней из холоднотвердеющих смесей : пат. ВУ 14304 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, А.К. Корнейчик. – Оpubл. 11.01.2011.
26. Способ получения связующего для изготовления литейных стержней в нагреваемой оснастке : пат. ВУ 14722 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, А.К. Корнейчик, А.М. Чернягов, В.В. Овчинников. – Оpubл. 10.05.2011.
27. Способ получения связующего для холоднотвердеющих смесей : пат. ВУ 15347 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук. – Оpubл. 23.09.2011.
28. Способ получения связующего для литейных оболочковых форм и стержней из горячеплакированных смесей : пат. ВУ 14362 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук. – Оpubл. 27.01.2011.

29. Способ получения связующего для изготовления древесностружечных плит : пат. ВУ 16269 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, А.К. Корнейчик. – Оpubл. 28.05.2012.
30. Способ изготовления древесностружечных плит : пат. ВУ 14235 / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, А.К. Корнейчик. – Оpubл. 30.04.2011.
31. Шишаков, Е.П. Использование фурановых смол для получения древесностружечных плит и фанеры / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук // Современные технологические процессы получения материалов и изделий из древесины материалы : сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф., 17–21 мая 2010 г. / Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2010. – С. 59–63.
32. Шишаков, Е.П. Применение карбамидоэфирных смол для получения фанеры / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук // Древесные плиты: теория и практика : 12-я междунар. науч.-практ. конф., 18–19 марта 2009 г. ; под ред. А.А. Леоновича. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 58–62.
33. Шишаков, Е.П. Новые виды связующих для получения водостойкой фанеры / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. Ч. 2. – Гродно, 2010. – С. 246–253.
34. Использование продуктов окисления гидролизного лигнина для выращивания лесных культур / Е.П. Шишаков [и др.] // Лесное и охотничье хозяйство. – 2001. – № 3. – С. 14–15.
35. Способ переработки технического лигнина с получением росторегулирующего вещества : пат. ВУ 7788 / Н.А. Зуева, Т.А. Корнейчик, Е.П. Шишаков. – Оpubл. 2005.
36. Шевчук, М.О. Переработка отходов гидролизной промышленности с получением росторегулирующего вещества / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления : материалы междунар. науч.-техн. конф., 28–29 мая 2008 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – С. 123–125.
37. пат. ВУ 12825 / М.О. Шевчук, Е.П. Шишаков, В.И. Вацило, А.К. Адамейко, И.С. Полоник. – Оpubл. 04.11.2009.
38. Шишаков, Е.П. Использование отходов переработки древесины в сельском хозяйстве / Е.П. Шишаков, М.О. Шевчук, В.Л. Флейшер // Сборник науч. тр. ГНУ СНИИЖК, Ставрополь, 2014. – Т. 2, вып. 7. – С. 236–240.
39. Тимохин, Б.В. Левулиновая кислота в органическом синтезе / Б.В. Тимохин, В.А. Баранский, Г.Д. Елисеева // Успехи химии. – 1999. – 68 (1). – С. 80–93.
40. Способ получения гамма-аминомасляной кислоты : пат. ВУ 18668 / В.С. Безбородов, С.Г. Михаленок, М.О. Шевчук. – Оpubл. 26.06.14.
41. Способ получения гамма-гидроксимасляной кислоты : пат. ВУ 18669 / В.С. Безбородов, С. Г. Михаленок, М.О. Шевчук. – Оpubл. 26.06.14.
42. Шевчук, М.О. Перспективы получения новых материалов из продуктов переработки растительного сырья / М.О. Шевчук // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии. Реактив-2012 : тез. XXVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2–4 окт. 2012 г. – Минск, 2012. – С. 89.
43. Виноградова, Л.М. Окислительная деструкция технического лигнина в комплексоны / Л.М. Виноградова // Материалы. Технологии. Инструменты : тез. докл. науч.-техн. конф. – Солигорск, 1998. – Т. 3, № 2. – С. 131. – (Спец. вып. : Новые материалы и технологии).
44. Горбатенко, И.В. Гумусосодержащее органоминеральное удобрение из отходов древесины / И.В. Горбатенко, М.А. Зильберглейт, М.С. Кебич // Материалы. Технологии. Инструменты : тез. докл. науч.-техн. конф., Солигорск, 1998. – Т. 3, № 2. – С. 139.
45. Пути промышленной переработки древесных отходов химико-лесного комплекса / И. В. Горбатенко [и др.] // Техника и технология экологически чистых производств : тез. 2 междунар. симпоз. молодых ученых, аспирантов и студентов. – М., 1998. – С. 44–45.
46. Переработка технического лигнина в комплексоны и комплексонаты металлов-микроэлементов для сельского хозяйства / В.С. Лисова [и др.] // Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (XVI) : Рефераты докл. и сообщ. № 2., М., 1998. – Т. 2 : Состояние и развитие производства химических продуктов. Материалы будущего и нетрадиционные химические технологии. Химические источники энергии. – С. 87.
47. Горбатенко, И.В. Утилизация малоценных отходов древесного вещества в гумусосодержащее удобрение / И.В. Горбатенко, М.А. Зильберглейт, М.С. Кебич // Материалы, технологии, инструменты. – 1996. – № 3. – С. 56.
48. Конверсия технического лигнина растворами азотной кислоты / Л.М. Виноградова [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – № 3. – С. 87–89.
49. Биоконверсия растительного сырья с фиксацией атмосферного азота / И.В. Арсонова [и др.] // Леса Беларуси и их рациональное использование : материалы междунар. науч.-техн. конф., 29–30 нояб. 2000 г., Минск. – Минск, 2000. – С. 113–115.

50. Органоминеральное удобрение из технического гидролизного лигнина / И.В. Арсонова [и др.] // Лесное и охотничье хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 23–24.
51. Гумификация древесных отходов в процессе их биодеструкции / М.С. Кебич // Агрохимия. – 1997. – № 3. – С. 17–21.
52. Применение перуксусной целлюлозы в специальных видах бумаги / Л.Ф. Пожидаева [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений // Лесной журнал. – 1988. – № 2. – С. 91–94.
53. Способ получения целлюлозного полуфабриката : а. с. SU 1258912 / М.А. Зильберглейт, Б.С. Симхович, Т.В. Каральчук, И.В. Смолова. – Оpubл. 07.04.1992.
54. Зильберглейт, М.А. Исследование процесса окислительной делигнификации древесины водными растворами органических надкислот : автореф. дис. ... канд. хим. наук / М.А. Зильберглейт. – Рига, 1982. – 22 с.
55. Способ получения целлюлозного полуфабриката из древесины лиственных пород : пат. RU 2019609 / М.А. Зильберглейт, И.В. Смолова, Б.С. Симхович.
56. Симхович, Б.С. Исследование процесса делигнификации древесины водными растворами уксусной кислоты / Б.С. Симхович, М.А. Зильберглейт, В.М. Резников // Химия древесины. – 1986. – № 3. – С. 34–38.
57. Дизайн анизотропных соединений на основе оптически активных эфиров молочной кислоты [Электронный ресурс] / С.Г. Михаленок [и др.] // Технология органических веществ : тез. 79-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 2–6 фев. 2015 г. / отв. за изд. И.М. Жарский ; УО «БГТУ». – Минск : БГТУ, 2015. – С. 58.

Поступила 04.08.2017

PROBLEMS AND ACHIEVEMENTS OF PLANT MATERIAL

*M. SHAUCHUK, V. BEZBORODOV, Ya. SHISHAKOU,
M. ZILBERGLEIT, S. YAKUBOVSKIY*

The paper summarizes the results of the authors' work on processing plant biomass into valuable products, intermediates and materials: furfural, furfural alcohol, protein feed, acetic acid, ethanol, microcrystalline cellulose, cellulose organosolventnyh, viscose cord, tsellolignin, organic fertilizer, oxidato cellolignina (growth promoters plants), γ -aminobutyric acid, γ -gidroksibutiric acid.

Key words: *plant material, plant biomass furfural, cellulose, lignin, plant growth stimulants.*

УДК 678.01:665.637.8:665.765:665.754

**СОВРЕМЕННЫЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

*канд. техн. наук Ю.А. БУЛАВКА;
Ю.С. ПЕТРОВСКАЯ; В.С. ШИРАБОРДИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Изучены свойства низкомолекулярного полиэтилена в рамках научного общества кафедры химии и технологии переработки нефти и газа Полоцкого государственного университета. Экспериментально подтверждены современные альтернативные направления его промышленного использования в получении нефтяных композиций различного назначения: депрессорной присадки в печное топливо, модификатора при получении полимер-битумных композиций и компонента смазочных материалов. Модифицирование нефтепродуктов низкомолекулярным полиэтиленом позволит расширить ассортимент депрессорных присадок к нефтяным топливам, компонентов смазочных материалов и полимеров-модификаторов полимер-битумных композиций, сократить вовлечение импортных добавок, снизить нагрузку на окружающую среду и получить положительный экономический эффект.

Ключевые слова: *низкомолекулярный полиэтилен, депрессорная присадка, нефтяные битумы, смазки, экономический эффект.*

Введение. Важными задачами, которые стоят сегодня перед отечественной химической промышленностью, выступают повышение качества выпускаемых продуктов, внедрение безотходных технологий. Актуальным направлением использования побочных продуктов нефтехимии, в частности низкомолекулярного полиэтилена, является вовлечение его в нефтяные композиции различного назначения для модифицирования их основных свойств. Процесс компаундирования и стадия введения модифицирующих добавок и присадок в продукты, такие как нефтяные битумы, смазочные материалы, топлива, – одни из ведущих в технологической схеме предприятий химической промышленности, поскольку обеспечивают формирование отвечающих современным требованиям стандартов качественных и количественных показателей товарной продукции.

Низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ) является побочным малотоннажным продуктом производства полиэтилена высокого давления низкой плотности, отделяется при сепарации возвратного газа (этилена). Процесс проводится в реакторах автоклавного или трубчатого типа. Низкомолекулярный полиэтилен состоит из смеси насыщенных углеводородов, преимущественно нормального строения с 10...20 атомами углерода, имеет высокую температуру вспышки (выше 250 °С) и низкую зольность (менее 0,1% масс.); представляет собой мазе- или воскоподобный продукт от белого до серовато-желтого цвета без посторонних включений и структурированного полимера и мало подвержен действию различных факторов, включая атмосферные; как гидрофобное вещество обладает высокой адгезией к различным материалам: бумаге, дереву, металлу, керамике [1–3], т.е. свойствами, присущими смазочным и битумным нефтяным материалам.

Свойства НМПЭ изменяются в достаточно широких пределах в зависимости от типа и технологических параметров процесса полимеризации этилена и применяемых инициаторов. Температура плавления НМПЭ может составлять 30...90 °С при производстве полиэтилена в реакторах трубчатого типа, в реакторах автоклавного типа – на уровне 65...120 °С в однозонном процессе и 25...65 °С в двухзонном процессе (в отличие от однозонного в двухзонном реакторе используется мешалка с дисковой перегородкой). На свойства НМПЭ оказывает влияние содержание в нем остатков белого инициаторного масла, служащего растворителем для перекисных инициаторов, применяемых в процессе полимеризации. Содержание масла в НМПЭ, произведенном в цехах завода «Полимир» ОАО «Нафтан», может составлять около 13% масс. Выход низкомолекулярного полиэтилена изменяется в зависимости от типа процесса, температурного режима в реакторе, применяемых инициаторов и в среднем составляет: 0,15 кг/т для однозонного процесса и 0,7 кг/т для двухзонного для цеха № 102; 0,2 кг/т полиэтилена для цеха № 105 завода «Полимир» ОАО «Нафтан».

Средняя молярная масса НМПЭ находится в пределах 1000...5000 г/моль, бимодальное молекулярно-массовое распределение в интервале от 50 до 5250, представляет собой аморфно-кристаллическое вещество (степень кристалличности от 3 до 16%), общее содержание СН₃-групп примерно в 3 раза превышает их содержание в полиэтилене высокого давления и составляет 4...8 единиц на 100 атомов углерода. При этом значительная часть из них приходится на боковые ответвления, среди которых большую долю составляют этильные и бутильные радикалы [2; 3]. Молекулы НМПЭ, кроме скелетных СН₂-групп, также содержат карбонильные, виниленовые и другие ненасыщенные связи и концевые СН₃-группы.

Низкомолекулярный полиэтилен устойчив к воздействию воды, солей, некоторых кислот и щелочей, при температуре более 80 °С растворим в алифатических и ароматических углеводородах, является неполярным веществом. Низкомолекулярный полиэтилен характеризуется по сравнению с высокомолекулярным большей пластичностью, низкой прочностью, значительной зависимостью механических свойств от температуры. Полиэтилен низкомолекулярный выпускают в соответствии с ТУ РБ 300041455.031-2004.

Традиционные направления промышленного использования НМПЭ [2]:

- в машиностроении – для шлифования и полирования сталей, цветных металлов и их сплавов;
- в целлюлозно-бумажной промышленности – для нанесения на картон или бумагу в виде восковой композиции с целью придания глянца, блеска, гибкости при низких температурах;
- при изготовлении резиновых изделий – в качестве технологической добавки как мягчитель и пластификатор;
- в текстильной промышленности – для пропитки тканей с целью придания им водоотталкивающих свойств, увеличения сопротивления разрыву, повышения прочности швов;
- в косметологии, стоматологии, ветеринарии и растениеводстве – в качестве основы косметических, лечебных средств и масел, где НМПЭ играет роль структурообразующего компонента, определяющего плотность и термостойкость изделия;
- в качестве компонента антикоррозионного покрытия, кровельных материалов – для защиты металлических, бетонных и других оснований, а также для герметизации швов в дорожном строительстве.

В настоящее время из-за снижения спроса на НМПЭ в качестве побочного продукта процесса полимеризации завода «Полимир» ОАО «Нафтан» существует проблема с его сбытом. В связи с этим актуальным является поиск его возможного рационального применения для модифицирования различных свойств нефтепродуктов на головном предприятии ОАО «Нафтан», что и определило цель настоящего исследования.

Современные альтернативные направления промышленного использования НМПЭ

1. *Низкомолекулярный полиэтилен как депрессорная присадка в топливо.* Общеизвестно, что для проявления депрессорных свойств полимеры должны обладать небольшой молярной массой и иметь в своем составе объемные либо полярные боковые группы, которые будут препятствовать кристаллизации парафинов в составе нефтепродуктов. Из этого следует, что разветвленная структура НМПЭ вместе с небольшой молярной массой вполне удовлетворяет данным требованиям.

В работах [2; 5] установлено, что НМПЭ обладает хорошими депрессорными свойствами, однако при этом ухудшается коэффициент фильтруемости дизельного топлива.

Низкомолекулярный полиэтилен может быть применен и в качестве компонента многофункциональных присадок. В частности, согласно патенту [6] НМПЭ входит в состав пакета присадок: низкомолекулярный полиэтилен (депрессорный компонент), сорбиталь С-20 (диспергирующий компонент), антидымная присадка С-150 (противодымный компонент) и метиловый эфир рапсового масла (противоизносный компонент), позволяющего улучшить смазывающие, низкотемпературные и экологические свойства дизельного топлива.

На базе низкомолекулярного полиэтилена высокого давления вырабатывается присадка Сандал-1А, вовлекаемая только в печное топливо. В дизельных топливах она неприменима, так как не влияет на предельную температуру фильтруемости [7; 8].

Авторы [9] выполнили синтез депрессорных присадок на основе низкомолекулярного полиэтилена и частичного гидролизованного полиакрилонитрила. Полученные привитые сополимеры полиэтилена с алкилированным продуктом гидролизованного полиакрилонитрила при вовлечении их в состав летного дизельного топлива в качестве 1,0 % масс. снижают температуру его застывания до минус 57 °С.

Установлено [10; 11], что сополимеры, полученные путем привитой радикальной сополимеризации стирола и НМПЭ в присутствии радикальных инициаторов, обладают значительными депрессорными свойствами, не уступающими промышленно выпускаемым присадкам, вовлечение предложенной авторами присадки в летнее дизельное топливо с добавкой сополимеров в количестве 0,01...0,03% масс. позволяет снизить температуру застывания на 25 °С (до -37 °С), а предельную температуру фильтруемости – на 10 °С.

Нами определена оптимальная концентрация НМПЭ, полученного в реакторах автоклавного типа на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» с температурой каплепадения 90 °С для вовлечения в печное топливо (рисунок 1). Образцы НМПЭ в концентрациях 0,05...0,3% масс. снижают температуру застывания печного топлива примерно на 20...40 °С, при этом на температуру помутнения НМПЭ не оказывают существенного влияния. Вероятно, депрессорное действие заключается в том, что молекулы НМПЭ адсорбируются на поверхности кристаллов твердых углеводородов, затем объемные боковые группы создают энергетический барьер за счет сил отталкивания, которые препятствуют притяжению и коагуляции парафинов в топливе. Оптимальная массовая доля НМПЭ, которая обеспечивает получение топлива печного бытового с нормируемой температурой застывания не выше минус 15 °С, составляет 0,05% масс. По депрессорной эффективности НМПЭ и присадки на его основе не уступают специально синтезированным импортным депрессорам. В ходе работы нами также выявлена низкая седиментационная устой-

чивость низкомолекулярного полиэтилена в печном топливе, которая повышается ультразвуковой обработкой, в частности внутренним облучением с погружением зонда-гомогенизатора ультразвукового SONICS Vibra cell в топливо.

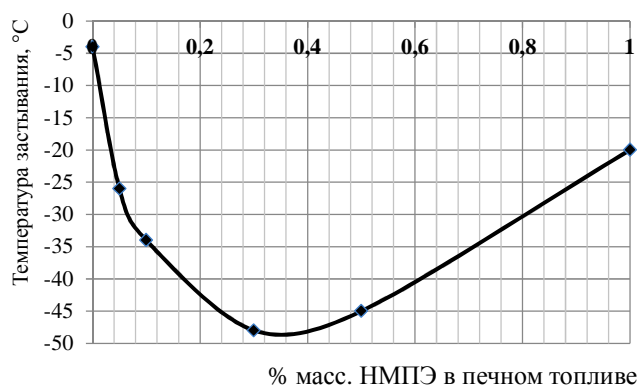


Рисунок 1. – Изменение температуры застывания от концентрации НМПЭ в печном топливе

Таким образом, неоспоримы преимущества НМПЭ как депрессора: дешевизна и доступность, высокая эффективность при низкой концентрации в топливе. Вовлечение НМПЭ в печное топливо позволяет снизить себестоимость продукта за счет использования отечественной присадки и дает возможность применять в качестве компонента топлива более тяжелые фракции нефти.

2. *Низкомолекулярный полиэтилен как модифицирующая добавка для битумов.* Общеизвестно, что введение в битум полимерных добавок позволяет направленно регулировать структурно-механические свойства материала. Битумно-полимерные композиции совмещают в себе качества, присущие нефтяным битумам и полимерам (высокая эластичность, теплостойкость, прочность, морозостойкость).

Известны способы использования низкомолекулярного полиэтилена для получения асфальтобетонных смесей, такие, например, как способ, включающий сырую нефть плотностью 0,93...0,98г/см³, низкомолекулярный полиэтилен и минеральный наполнитель [12, 13]; способ, включающий битум или каменноугольную смолу, низкомолекулярный полиэтилен, пластификатор (машинное масло и дополнительно толуол и этилсиликат), минеральный наполнитель – маршаллит и отходы аэросила [14].

Добавка НМПЭ к нефтяному гудрону в процессе окисления позволяет получать кровельные битумы с улучшенными пластичными и низкотемпературными свойствами. При этом оптимальное количество вводимого в гудрон НМПЭ составляет около 10% масс. Низкомолекулярный полиэтилен может также применяться для улучшения свойств битума при производстве и строительстве асфальтобетонных покрытий (особенно эксплуатируемых в климатических условиях со значительными перепадами температуры) [15].

В работе [16] представлены результаты исследований по изучению влияния НМПЭ на свойства модифицированных битумов с целью получения дорожных, кровельных и изоляционных битумов. НМПЭ при небольших концентрациях оказывает пластифицирующее действие на структуру битума, однако проявляет недостаточно высокие адгезионные свойства. НМПЭ образует в битуме структурную сетку, которая сохраняет прочность, эластичность как при высоких, так и при низких температурах.

В работе [17] приводятся сведения о расширении интервала пластичности битумов и улучшении низкотемпературных показателей природных битумов Мунайлы-Мола и Иманкара при их модификации 3...5% масс. НМПЭ с молярной массой от 2 до 8 тыс., с температурой плавления 80...120 °С, содержащего следы катализатора TiCl₄.

Нами приготовлены полимер-битумные композиции на основе дорожного битума марки БНД 70/100, производимого по СТБ EN 12591, и полимера-модификатора, полученного совместной термической обработкой при 100...120 °С остатка смолы пиролизной тяжелой (СПТ), и низкомолекулярного полиэтилена в соотношении 1:(1...2) в течение 90...120 минут. Компаундирование дорожного битума с предлагаемым полимером-модификатором осуществляли при температуре выше температуры размягчения битума, но не выше 150...160 °С в течение 90...120 минут, концентрация полимера-модификатора в дорожном битуме составляла 1...3% масс. Получение полиэтиленбитумных композиций производили в цилиндрическом смесителе с механическим перемешивающим устройством с регулируемым подогревом всей наружной поверхности. Низкомолекулярный полиэтилен использовали с температурой каплепадения 90 °С. В качестве пластификатора использовали неперегоняющийся при атмосферном давлении остаток разгонки СПТ, получаемой по ТУ РБ 300041455.002-2003 на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», из которой извлечена жид-

кая фракция с концом кипения до 230...250 °С. Введение пластификатора позволяет повысить пластичность композиций и совместимость НМПЭ с битумом.

Свойства полученных полиэтиленбитумных композиций в сравнении с товарным битумом и стандартами качества представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Свойства полученных полиэтиленбитумных композиций в сравнении с товарным битумом и стандартами качества

Основные показатели	Пенетрация, 0,1 мм, при 25 °С по ГОСТ 11501	Температура размягчения, °С, по методу «Кольцо и шар», по ГОСТ 11506	Растяжимость, см, при 25 °С по ГОСТ 11505	Температура хрупкости по Фраасу, °С, по ГОСТ 11507	Индекс пенетрации по ГОСТ 22245
Норма по СТБ EN 12591 для БНД 70/100	70...100	43...51	не нормируется	< -10	-1,5... 0,7
Норма по ГОСТ 33133 для БНД 70/100	71...100	> 47	> 62	< -18	-1...1
Норма по СТБ 1220 для БМА 70/100	71...100	> 52	не нормируется	< -20	не нормируется
Фактическое значение для битума марки БНД 70/100	69	44,9	61,5	-15	-1,84
<i>Модифицированный битум БНД 70/100 комбинированной добавкой состоящей из остатка СПТ и НМПЭ в массовом соотношении 1:2</i>					
1% масс.	86,3	46,0	64,5	-25	-0,92
3% масс.	73,5	47,5	57,5	-19	-0,92
5% масс.	72,7	49,3	52,2	-15	-0,47
<i>Модифицированный битум БНД 70/100 комбинированной добавкой состоящей из остатка СПТ и НМПЭ в массовом соотношении 1:1</i>					
1% масс.	90,0	43,3	86,5	-26	-1,67
3% масс.	80,0	44,0	61,9	-20	-1,74
5% масс.	74,0	44,3	48,4	-16	-1,86

Из представленных данных следует, что у полиэтиленбитумных композиций повышается температура размягчения (при массовом соотношении остатка СПТ и НМПЭ 1:2) и снижается температура хрупкости модифицированного битума, за счет чего улучшаются показатели тепло- и трещиностойкости, а значит, расширяется температурный диапазон работоспособности полимер-битумной композиции, повышается ее качество и долговечность. Комбинированная добавка во всех образцах приводит к повышению пенетрации и, как следствие, к уменьшению твердости битума. При вовлечении 1% масс. комбинированной добавки увеличивается растяжимость битума, за счет чего улучшаются его эластичность. Индекс пенетрации полиэтиленбитумных композиций, полученных при массовом соотношении остатка СПТ и НМПЭ 1:2, соответствует требованиям ГОСТ 33133. Дисперсная структура модифицированного битума наиболее приближена к типу золь-гель, оптимальному с точки зрения качества дорожного битума. Все образцы полиэтиленбитумных композиций выдержали испытание на сцепление с гранитным щебнем по ГОСТ 11508 не менее 3/4 покрытия поверхности минерального материала.

Ввод в действие с 1 мая 2017 года нового ГОСТ 33133 на нефтяные дорожные вяжущие взамен СТБ EN 12591 существенно повышает требования к параметрам качества дорожного битума, что влечет за собой необходимость проведения технического перевооружения и модернизации действующих установок и процессов на нефтеперерабатывающих заводах. При этом производство битумов практически не приносит прибыли, т.е. подобные модернизации будут нерентабельными. Для доведения основных показателей качества дорожного битума до требований современных стандартов предлагается использовать термически подготовленную комбинированную добавку, состоящую из остатка СПТ и НМПЭ в массовом соотношении 1:2 с концентрацией до 3% масс., на примере битума марки БНД 70/100 оптимальная концентрация добавки 1% масс. При этом стоимость сырьевых компонентов добавки соизмеримо со стоимостью товарного битума.

При вовлечении в битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 60/90 комбинированной добавки, состоящей из остатка СПТ и НМПЭ в массовом соотношении 1:2 в концентрациях до 3% масс., можно получить битум, модифицированный дорожный марки БМА 70/100, соответствующий требованиям СТБ 1220-2009.

Совместное влияние компонентов комбинированной добавки на структуру битума позволяет значительно повысить его прочность и теплостойкость, стойкость к колееобразованию при повышенных

температурах, а также пластичность, эластичность, трещиностойкость, улучшить адгезию к поверхности минеральных материалов, что позволяет прогнозировать высокое качество дорожного покрытия.

Таким образом, НМПЭ является перспективным полимерным модификатором при получении полимерно-битумных материалов.

3. *Низкомолекулярный полиэтилен как основа для получения смазочных композиций.* Благодаря тому, что НМПЭ состоит из смеси насыщенных углеводородов преимущественно нормального строения, он стоек к действию коррозионно- и химически агрессивных сред, является водонепроницаемым гидрофобным веществом, проявляет высокую стойкость к атмосферному старению. Все перечисленные свойства являются ценными, присущими консервационным смазывающим материалам [1–3].

Авторы [18] предлагают консистентную смазку, применяемую в химической и нефтехимической промышленности, машиностроении, где требуется применение химически стойких, консервационно-защитных, канатных, вакуумных консистентных смазок, содержащую 75...90% масс. низкомолекулярного полиэтилена и 10...25% масс. гидроочищенной остаточной фракции нефтепереработки.

В работе [19] предложены различные антикоррозионные покрытия-смазки и мастики на основе низкомолекулярного полиэтилена, которые могут найти применение для гидроизоляции и антикоррозионной защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования.

Нами получен ряд образцов смазочных композиций на основе низкомолекулярного полиэтилена с температурой плавления выше 90 °С и низкой массовой долей летучих веществ. В качестве мягчителей для снижения вязкости композиций использованы различные по свойствам дисперсионные среды, произведенные на ОАО «Нафтан»: депарафинированное масло четверного пагона с установки депарафинизации метилэтилкетонем и толуолом (ДП-4); вакуумный дистиллят четверного пагона с установки вакуумной трубчатки (ВД-4); продукт остаточный с установки мягкого гидрокрекинга (остаток МГК), продукт остаточный гидрокрекинга процесса «Юникрекинг» (остаток ГК), экстракт дистиллятный с установки селективной очистки фенолом (ДЭСО), экстракт остаточный с установки селективной очистки фенолом (ОЭСО). Синтезированные смазки представляют собой однородные липкие термически обратимые высококонсистентные дисперсные системы от вазелинообразного до полутвердого вида. Полученные смазки оказались схожими по свойствам с углеводородными, поэтому их тестировали по показателям, заложенным в нормативные документы на консервационную смазку ПВК и ГОИ-54п, а также химически стойкую ЦИАТИМ-205. Результаты анализа смазочных композиций, а также требования к промышленно выпускаемым углеводородным смазкам приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Свойства синтезированных смазочных композиций на основе НМПЭ

Показатели	Смазочные композиции на основе НМПЭ с различными дисперсионными средами						ПВК	ЦИАТИМ-205	ГОИ-54п	Метод испытания	
	ДП-4	ВД-4	Остаток МГК	Остаток ГК	ДЭСО	ОЭСО					
Температура каплепадения, °С	60	61	68	73	67	63	не ниже 60	не ниже 65	не ниже 61	ГОСТ 6793-74	
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм за 5 с	102	205	160	158	190	192	90...150	не более 165	200...245	ГОСТ 5346-78	
Температура сползания, °С	55	53	63	60	57	48	не ниже 50	–	не ниже 48	ГОСТ 6037-75	
Кислотное число, мг КОН/г	отс.	0,10	отс.	отс.	0,09	0,06	0,5...1	не более 0,05	0,6...0,9	ГОСТ 5985-79	
Испаряемость, за 1 ч при 100 °С/150 °С	0,704/1,562	0/0	0,005/0,833	0/0	0/0	0/0	0/0	1/15	13/не норм	ГОСТ 9566-74	
Окисляемость при 120 °С за 10 ч, мг КОН/г	0,02	0,24	отс.	отс.	0,35	0,26	–	0,2	–	ГОСТ 5734-76	
Коллоидная стабильность, % масс.	0,307	7,05	2,77	4,17	3,64	7,76	не более 4	менее 4	не более 7	ГОСТ 7142-74	
Коррозионное воздействие на металлы (5 ч при 70 °С)	Выдерживает										
	сталь, алюминий, медь						медь	сталь, алюминий	сталь, медь	ГОСТ 9.080-77	
Содержание механических примесей, %	не более 0,01						не более 0,07	не более 0,01	не более 0,015	ГОСТ 9270-86	
Интервал применения, °С	–60...50						–50...50	–60...50	–40...50	–	

Из таблицы видно, что по большинству показателей синтезированные смазки на основе НМПЭ с остаточными продуктами гидрокрекинга как низкого, так и высокого давления сходны с антифрикционной химически стойкой ЦИАТИМ-205, замешанные с вакуумным дистиллятом четверного погона сходны с морозостойкой смазкой ГОИ-54п, а композиции с дистиллятным и остаточными экстрактами аналогичны по свойствам с консервационной смазкой ПВК. Верхний температурный предел применения смазок на основе НМПЭ находится в пределах 50...60 °С. При этом для получения смазок с температурой каплепадения не ниже 60 °С концентрация дисперсионной среды должна составлять не более 30% масс. Анализ химической стойкости, оцениваемой по ГОСТ 21068, показал, что в течение 30 суток образцы, погруженные в 10%-ные водные растворы соляной и серной кислот, щелочи и соли, не подвержены изменению массы и внешнего вида (отсутствуют трещины, вздутия, отслоения и др.), т.е. смазки на основе НМПЭ являются химически стойкими.

Нижний температурный предел применения смазочных композиций на основе НМПЭ определен по динамической вязкости по ГОСТ 7163 и составил не ниже минус 25 °С, динамическая вязкость при этих температурах близка к 1500 Па·с – максимально допустимая величина для консистентных смазок [32].

При испытании смазок на основе НМПЭ на морозостойкость после 5 ч выдержки при температуре около минус 60 °С не обнаружено трещин и отслаивания смазки от поверхности пластинок, хрупкость смазок не выявлена, смазки оставались пластичными и липкими. Микроскопическим анализом не обнаружено в смазках инородных включений и механических примесей.

Таким образом, по комплексу физико-химических и эксплуатационных свойств синтезированные смазки на основе НМПЭ отвечают требованиям, предъявляемым к антифрикционным и консервационным смазкам типа ЦИАТИМ-205, ГОИ-54п и ПВК [1; 2; 20–33], причем исходные компоненты для их приготовления дешевле, чем у промышленно производимых смазок (например, в сравнении со смазкой ЦИАТИМ-205 при использовании НМПЭ и продукта остаточного гидрокрекинга стоимость в 2 раза ниже).

Заключение. В целом использование НМПЭ для модифицирования свойств нефтяных топлив, смазочных и битумных материалов целесообразно при его вовлечении в небольших количествах, что обусловлено ограниченностью объема выпуска НМПЭ, в частности по заводу «Полимир» ОАО «Нафтан» около 100 тонн в год. Наиболее перспективные современные альтернативные направления промышленного использования НМПЭ:

- организация производства смазочных композиций на основе НМПЭ, которые изготавливают на установках периодического действия, что позволяет накопить достаточное количество сырьевых компонентов;
- вовлечение НМПЭ в печное топливо с целью модифицирования его низкотемпературных свойств;
- использование НМПЭ как полимера-модификатора при получении полимерно-битумных материалов.

Модифицирование нефтепродуктов низкомолекулярным полиэтиленом позволит расширить их ассортимент, сократить вовлечение импортных добавок, снизить нагрузку на окружающую среду и получить положительный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Получение композиционных материалов на основе отходов нефтехимии и нефтепереработки / Ю.А. Булавка [и др.] // Нефтехимический комплекс : науч.-техн. бюл. Приложение к журналу «Вестник Белнефтехима». – 2017. – № 1 (16). – С. 10–12.
2. Павлов, А.В. Основные направления использования низкомолекулярного полиэтилена и его влияние на свойства нефтепродуктов / А.В. Павлов, А.А. Ермак // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2008. – № 2. – С. 123–127.
3. Нефтяные композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена / Ю.А. Булавка [и др.] // Наука и инновации. – 2017. – Т. 6, № 172. – С. 31–33.
4. Шийчук, А.В. Окисленный низкомолекулярный полиэтилен как смазочно-охлаждающий состав / А.В. Шийчук, Д.В. Колесникова // Химия и технология топлив и масел. – 1991. – № 7. – С. 5–6.
5. Разработка и внедрение депрессорной присадки к среднестиллятным топливам на базе низкомолекулярных полимеров этилена / А.М. Данилови [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 1993. – Вып. 12. – С. 21–23.
6. Многофункциональная присадка к дизельному топливу : пат. ВУ 12275 / С.А. Колтунова-Сето, С.В. Покровская, С.М. Ткачев, С.Ф. Якубовский. – Оpubл. 30.08.2009.
7. Данилов, А.М. Применение присадок в топливах для автомобилей. Справочник / А.М. Данилов. – М. : Химия, 2000. – 232 с.
8. Низкомолекулярный полиэтилен как депрессорная присадка к печным топливам / Л.Н. Шапкина [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 1988. – № 12. – С. 15–16.

9. Депрессорные присадки на основе низкомолекулярного полиэтилена и изучение механизма их действия на дизельные топлива С.Ф. Фозилов [и др.] // Молодой ученый. – 2015. – № 3. – С. 249–251.
10. Низкомолекулярный полиэтилен как компонент депрессорных присадок к топливам / И.М. Прохорченко [и др.] // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 58–60.
11. Раскулова, Т.В. Техничко-экономическое обоснование совершенствования технологии и организации производства депрессорных присадок к топливам на основе бинарных сополимеров стирола и низкомолекулярного полиэтилена / Т.В. Раскулова, Т.М. Зеленцова // Сборник науч. тр. Ангарского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 1. – № 1. – С. 025–031.
12. Shirabordina, V. Petroleum road bitumen modified by waste of petrochemical industry / V. Shirabordina, M. Rusyayeva, Yu. Bulauka // European and national dimension in research. technology (Европейский и национальный контексты в научных исследованиях) : Electronic collected materials of ix junior researchers' conference, Novopolotsk, april 26–27, 2017 / Polotsk state university ; Ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2017. – P. 236–238.
13. Смесь асфальтобетонная : а. с. SU 798068 / С.В. Мещеряков, Н.А. Панкратов [и др.]. – Оpubл. 23.01.1981.
14. Битумоминеральная смесь : а. с. SU 808440 / Л.Я. Лаврега, И.В. Бориславская. – Оpubл. 28.02.1981.
15. Евдокимова, Н.Г. О возможности получения кровельных битумов окислением гудрона с низкомолекулярным полиэтиленом / Н.Г. Евдокимова, М.Ю. Булатникова // Нефтегазовое дело : электрон. науч. журн. – 2006. – № 1. – С. 31.
16. Евдокимова, Н.Г. Разработка научно-технологических основ производства современных битумных материалов как нефтяных дисперсных систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / Н.Г. Евдокимова ; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2015. – 53 с.
17. Страхова, Н.А. Получение нефтяных битумов из нетрадиционного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 02.00.13 / С.-Петербург. гос. технол. ин-т. – СПб., 2001. – 40 с.
18. Новичихин, Д.Н. Смазочная композиция на основе низкомолекулярного полиэтилена / Д.Н. Новичихин, В.С. Войтик // Химия и технология топлив и масел. – 1998. – № 6. – С. 24–26.
19. Искандеров, Р.А. Антикоррозионные покрытия-смазки и мастики на основе низкомолекулярного полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Р.А. Искандеров. – Казань, 2002. – 221 с.
20. Булавка, Ю.А. Смазочные композиции на основе отходов производства полиэтилена, отработанных масел и побочных продуктов масляного производства / Ю.А. Булавка, С.В. Покровская // Eurasia Green : материалы междунар. конкурса науч.-исслед. проектов молодых ученых и студентов ; отв. за вып. М.В. Федоров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2012. – С. 7–9.
21. Технология переработки нефти и газа. Пластичные смазки : учеб.-метод. компл. для студентов специальности 1-48 01 03 «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» / С.В. Покровская, Н.В. Ощепкова, Ю.А. Булавка. – Новополюцк : ПГУ, 2010. – 239 с.
22. Покровская, С.В. Смазочные композиции на основе отходов производства / С.В. Покровская, Ю.А. Булавка // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортзамещение: проблемы и пути решения : сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 2 т. – Т. 1. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 380–382.
23. Утилизация отхода полимерного производства для модифицирования свойств нефтепродуктов / Ю.С. Петровская [и др.] // Эколого-енергетичні проблеми сучасності : зб. наук. праць всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, Одеса, 14 квітня 2017 р. – Одеса, Вид-во ОНАХТ. – 2017. – С. 86–88.
24. Покровская, С.В. Пластичные смазки на основе низкомолекулярного полиэтилена завода «Полимир» ОАО «Нафтан» / С.В. Покровская, Н.В. Ощепкова, Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 173–176.
25. Рациональная утилизация отхода производства – низкомолекулярного полиэтилена для модифицирования свойств нефтепродуктов / Ю.С. Петровская [и др.] // «Ғылым және білім – 2017» студенттер мен жас ғалымдардың XII Халықаралық ғылыми конференциясы = The XII International Scientific Conference for students and young scholars «Science and education – 2017» = XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2017». – Астана, 2017. – С. 1131–1136.
26. Петровская, Ю.С. Получение печного топлива с вовлечением депрессорных присадок на основе низкомолекулярного полиэтилена / Ю.С. Петровская, Е.П. Сычёва, Ю.А. Булавка // Нефть и газ – 2017 : сб. тез. 71-й Междунар. молодеж. науч. конф., Москва, 18–20 апр. 2017 г. – Т. 2. – М. : РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017. – С. 423.
27. Булавка, Ю.А. Консистентные смазочные композиции на основе остаточных продуктов нефтепереработки и нефтехимии / Ю.А. Булавка, В.И. Сыцевич, О.С. Василевская // Нефть и газ – 2017 : сб. тез. 71-й Междунар. молодежной науч. конф., Москва, 18–20 апр. 2017 г. – Т. 2. – М. : РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017. – С. 311.

28. Сыцевич, В.И. Консистентные смазочные композиции на основе отходов производства / В.И. Сыцевич, О.С. Василевская, Ю.А. Булавка // Безопасность – 2017 : материалы докл. XXII Всерос. студенч. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Проблемы экологической и промышленной безопасности современного мира», Иркутск, 24–27 апр. 2017 г. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 213–215.
29. Sytsevich, V. Lubricant compositions based on waste products / V. Sytsevich, Yu. Bulauka // European and national dimension in research. Technology (Европейский и национальный контексты в научных исследованиях) : Electronic collected materials of ix junior researchers' conference, Novopolotsk, april 26–27, 2017 / Polotsk state university ; Ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2017. – P. 226–227
30. Пластичные смазки на основе низкомолекулярного полиэтилена завода «Полимир» ОАО «Нафтан» / С.В. Покровская, Н.В. Ощепкова, Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2009 . – № 8. – С. 173–176.
31. Булавка, Ю.А. Смазочные композиции на основе отходов производства / Ю.А. Булавка, С.В. Покровская // Материалы IX Междунар. промышленно-экономического форума «Стратегия объединения: Решение актуальных задач нефтегазового и нефтехимического комплексов на современном этапе», Москва, 24–25 нояб. 2016 г. – М. : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016. – С. 133–134.
32. Синецын, В.В. Подбор и применение пластичных смазок / В.В. Синецын. – М. : Химия, 1974. – С. 130–131.
33. Петровская, Ю.С. Рациональная утилизация отхода полимерного производства путем модифицирования свойств нефтепродуктов / Ю.С. Петровская, Ю.А. Булавка, В.С. Ширабордина // Дальневосточная весна – 2017 : материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 5 июня 2017 г.; редкол.: И.П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО«КнАГТУ», 2017. – С. 86–88.

Поступила 08.08.2017

MODERN ALTERNATIVE DIRECTIONS FOR INDUSTRIAL USE OF LOW-MOLECULAR POLYETHYLENE

YU. BULAUKA, YU. PIATROUSKAYA, V. SHIRABORDINA

The properties of low molecular weight polyethylene have been studied. Within the scientific community of the Department of Chemistry and Technology of Oil and Gas Processing of the Polotsk State University, modern alternative directions of its industrial use in obtaining oil compositions for various purposes have been experimentally confirmed (as a depressant additive in furnace fuel, a modifier in the preparation of polymer-bitumen compositions and a component of lubricants). Modification of petroleum products with low molecular weight polyethylene will expand the range of depressant additives to petroleum fuels, lubricant components and polymers-modifiers of polymer-bitumen compositions, reduce the involvement of import additives, reduce the load on the environment and obtain a positive economic effect.

Keywords: *low molecular weight polyethylene, depressant additive, petroleum bitumen, lubricants.*

УДК 663.551.41

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ И ПРЯМОТОЧНОЙ КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ

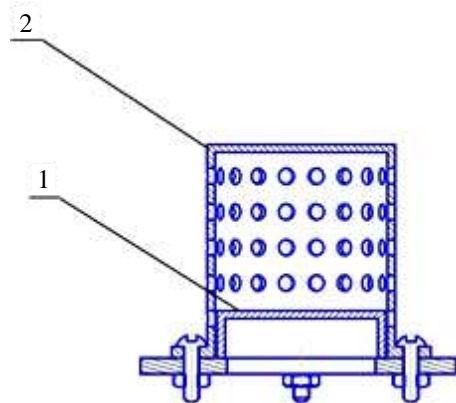
Д.Н. МАЙТАМ

Представлена новая конструкция клапанной тарелки. Приведены результаты экспериментальных исследований и сопоставительный анализ основных рабочих характеристик тарелки новой конструкции (эффективность массопередачи, межтарельчатый унос жидкости) и существующего аналога. Исследования проведены для четырех различных вариантов конструктивного исполнения колпачков тарелки. Сделан вывод, что клапанная тарелка новой конструкции отличается улучшенными массообменными и гидродинамическими характеристиками по сравнению с прямоточной. Получены математические модели, описывающие зависимости эффективности тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки.

Ключевые слова: тарелки клапанные и прямоточные; дисковые клапаны; колпачки; рабочие характеристики, сопоставительный анализ.

Клапанные тарелки имеют широкое применение в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Основные преимущества этих тарелок – способность обеспечить эффективный массообмен в большом интервале рабочих нагрузок, несложность конструкции, низкая металлоемкость и невысокая стоимость. Клапанные тарелки изготавливают с дисковыми и прямоугольными клапанами; работают тарелки в режиме прямоточного или перекрестного движения фаз. В промышленности наиболее распространены клапанные прямоточные тарелки с дисковыми клапанами [1].

Основная часть. Объектом представляемого исследования является новая клапанная тарелка [2], саморегулирующиеся дисковые клапаны 1 которой устанавливаются в перфорированные колпачки 2, на отверстия полотна, способны подниматься при движении пара (газа), что проиллюстрировано рисунком 1.



1 – саморегулирующийся дисковый клапан;
2 – перфорированный колпачок

Рисунок 1. – Клапан исследуемой тарелки

Диаметр отверстий в тарелке для прохода газовой фазы несколько меньше диаметра дисковых клапанов и перфорированных колпачков, благодаря чему клапан удерживается на тарелке. Высота подъема клапана ограничивается высотой колпачка. Колпачки крепятся к полотну тарелки при помощи болтов. Свободно лежащий над отверстием в тарелке клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину площади зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа и тем самым поддерживает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. При этом с увеличением скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление клапанной тарелки увеличивается незначительно.

Конструктивные параметры клапана новой тарелки оптимизированы и выбраны по определенным критериям.

Надежность и равномерность работы. При переменных нагрузках по газу и жидкости, неравномерности распределения газового потока по сечению колонны новая тарелка обеспечивает правильное регулирование свободной

поверхности для выхода газа благодаря саморегулированию клапанов и конструкции клапанов, исключая возможность их перекоса.

Минимизация провала жидкости на новой тарелке достигается путем минимизации свободного сечения для выхода газа при минимальных нагрузках по газу и созданию гидравлического лабиринта, препятствующего провалу жидкости через клапаны.

Компенсация прямоточного движения взаимодействующих фаз и максимизация поверхности контакта фаз реализуется на новой тарелке за счет следующих факторов: широкого диапазона устойчивой работы тарелки в пенном режиме благодаря барботированию газа в виде мелких пузырьков и струй газа, образующихся при выходе газа из перфорированных колпачков; максимизации перфорации колпачка в условиях ограничений, таких как требуемая прочность конструкции клапана при изготовлении и работе; возможность засорения отверстий клапана (применение отверстий с диаметром менее 2 мм нецелесообразно).

Автором проведены исследования новой тарелки с двумя значениями высоты колпачков: 27 и 21 мм. Кроме этого, в двух вариантах выполнена перфорация колпачка: с диаметром отверстий 2 и 3 мм.

Основные параметры исследуемой тарелки представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные параметры исследуемой тарелки

Параметр	Вариант	Вариант	Вариант	Вариант
	1-го колпачка	2-го колпачка	3-го колпачка	4-го колпачка
Диаметр отверстий перфорации колпачка, мм	2	3	2	3
Высота колпачка, мм	27		21	
Количество отверстий перфорации колпачка	65		52	
Количество рядов отверстий по высоте колпачка	5		4	
Количество отверстий в горизонтальном ряду колпачка	13			
Внутренний диаметр колонны, мм	144			
Толщина полотна тарелки, мм	3			
Внутренний диаметр колпачка, мм	22			
Внешний диаметр клапана, мм	21,8			
Масса клапана, г	6			
Высота клапана, мм	6			
Число клапанов на тарелке	7			
Площадь поперечного сечения колонны, м ²	0,01629			
Площадь всех отверстий, м ²	0,0022			
Доля свободного сечения тарелки ϕ , %	13,5			
Площадь рабочего сечения тарелки, м ²	0,01078			

В представляемой работе проводится сопоставление массообменных характеристик *клапанной тарелки новой конструкции* с характеристиками *прямоточной клапанной*, на основе которой разработана тарелка новой конструкции.

Клапанная прямоточная тарелка (объект для сравнения) разработана во ВНИИнефтемаше, её клапан (рисунок 2) представляет собой круглую конструкцию в виде диска с двумя направляющими и одной задней ножкой.

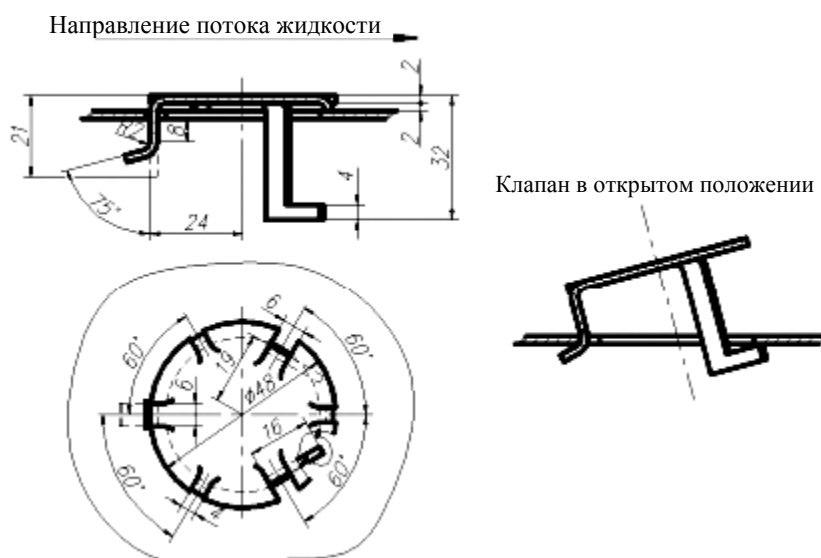


Рисунок 2. – Клапан прямоточной клапанной тарелки

Выбор прямоточной клапанной тарелки (ПК) в качестве объекта сравнения обусловлен следующими факторами:

- тарелка ПК успешно используется во многих процессах нефтепереработки и нефтехимии;
- большой накопленный опыт промышленной эксплуатации тарелки ПК и наличие данных о гидродинамических и массообменных характеристиках тарелки;
- в качестве данных для сравнения гидродинамических и массообменных характеристик тарелки ПК с таковыми для тарелки новой конструкции в данной работе используются результаты проведенных исследований в работе [3].

Основные параметры сравниваемых тарелок приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Основные параметры сравниваемых тарелок

Параметр	Клапанная тарелка новой конструкции	Тарелка прямооточная клапанная
Размер сечения колонны, мм	Ø144	630×160
Толщина полотна тарелки, мм	3	2
Диаметр отверстия под клапан, мм	20	40
Масса клапана, г	6	35
Число клапанов на тарелке	7	12
Площадь поперечного сечения колонны, м ²	0,01629	0,1008
Площадь всех отверстий, м ²	0,0022	0,0151
Доля свободного сечения тарелки ф, %	13,5	14,95
Площадь рабочего сечения тарелки, м ²	0,01078	0,0864

Сопоставление уноса жидкости с тарелок. Проанализируем работу тарелок по показателю «межтарельчатый унос жидкости». Унос жидкости на вышележащие тарелки потоком паров приводит к ухудшению эффективности работы тарелок и увеличению их жидкостных нагрузок. Поэтому при гидравлическом расчете необходимо определять в том числе и величину межтарельчатого уноса при рабочих нагрузках тарелки по пару и жидкости.

При измерении величины уноса жидкости на новой конструкции тарелки приведенная скорость w изменялась в диапазоне 1,7...2,21 м/с. Измерения проводились при различной плотности орошения тарелки q : 8,6 м³/м²·ч; 10,8 м³/м²·ч; 13,2 м³/м²·ч; 15,5 м³/м²·ч. Высота сепарационного пространства H (расстояние от тарелки до сборника жидкости) в ходе эксперимента принимала фиксированные значения 280 и 380 мм.

В ходе анализа величины уноса жидкости на тарелке новой конструкции осуществлялось её сравнение с расчетными значениями для тарелок с дисковыми клапанами. Расчетные значения уноса жидкости для таких тарелок определялись согласно данным работы [4] по уравнению (1):

$$e = 0,757 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{w^{2,7}}{H^3}, \quad (1)$$

где e – относительный унос жидкости на вышележащую тарелку, кг жидкости/кг газа; w – скорость газа в колонне, м/с; H – расстояние между тарелками, м.

На рисунках 3–6 представлены результаты сопоставления экспериментальных значений межтарельчатого уноса жидкости с тарелки новой конструкции с расчетными значениями величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами, найденными по уравнению (1).

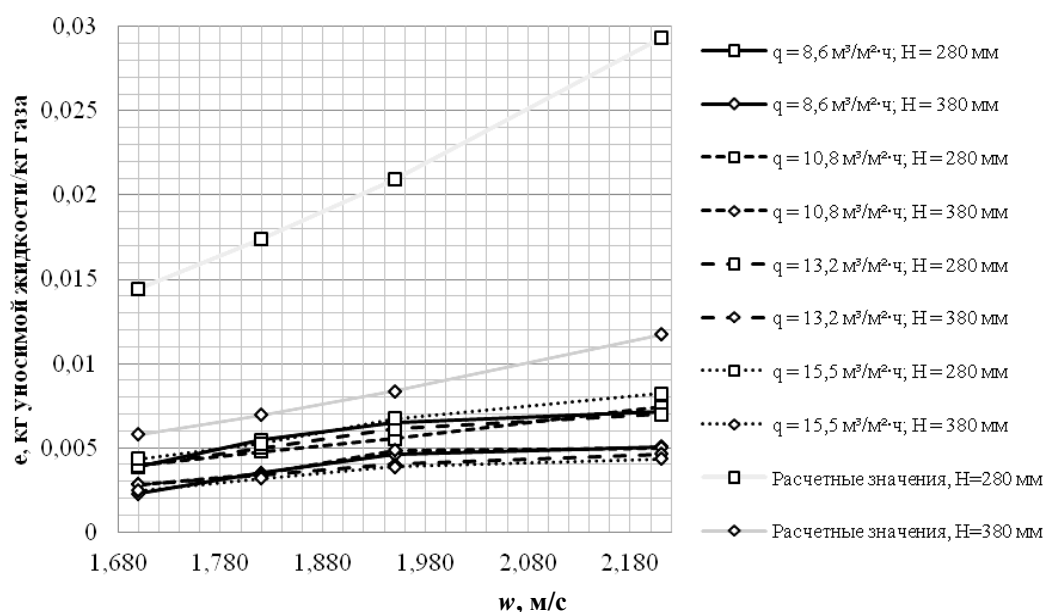


Рисунок 3. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 1-го колпачка) и с тарелки с дисковыми клапанами

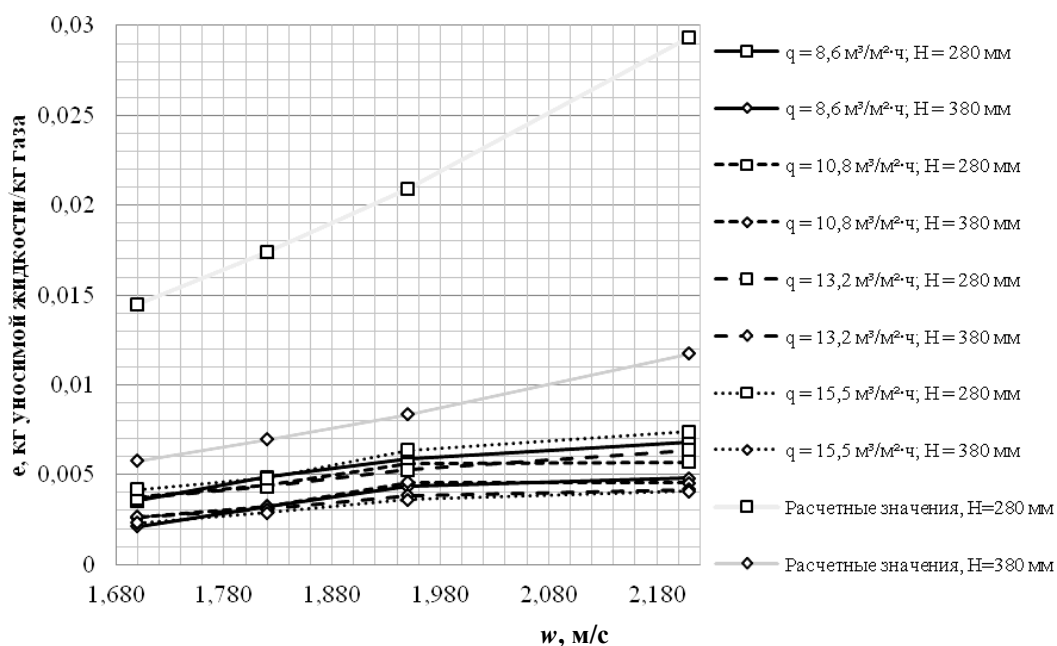


Рисунок 4. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 2-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

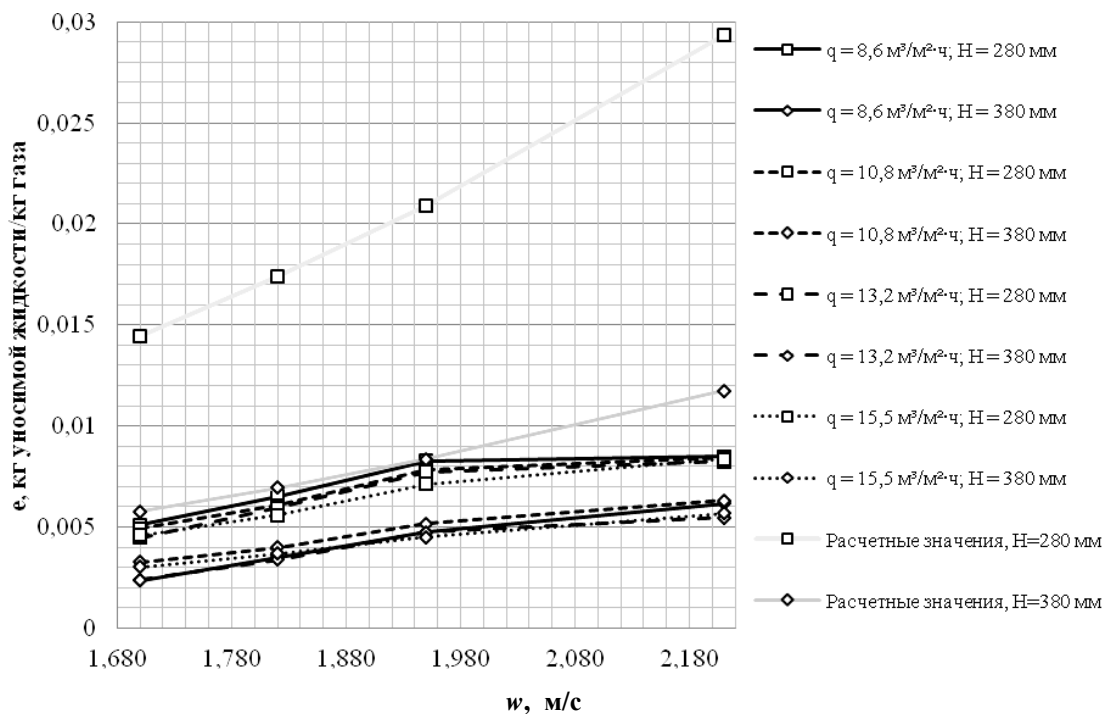


Рисунок 5. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 3-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

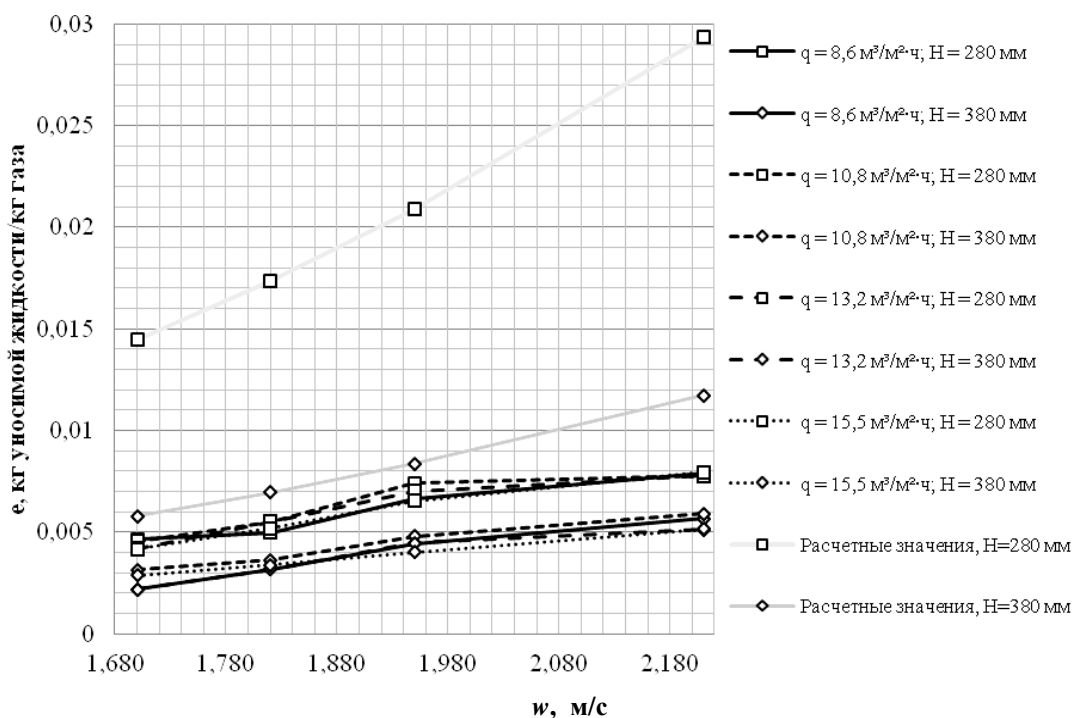


Рисунок 6. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 4-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

Исходя из анализа приведенных графиков (см. рис. 3–6), а также принимая во внимание разработанные в литературных источниках расчетные методики определения межтарельчатого уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами [4], предлагается следующее общее выражение зависимости межтарельчатого уноса жидкости от скорости газа и расстояния между тарелками:

$$e = A \cdot \frac{w^B}{H^C}. \quad (2)$$

Здесь A , B и C – коэффициенты регрессии.

В результате статистической обработки экспериментальных данных и нахождения коэффициентов A , B и C установлено, что зависимость межтарельчатого уноса жидкости для тарелки новой конструкции имеет вид:

$$e = 2,60 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{w^{2,10}}{H^{1,37}}, \quad R = 0,93, \quad (3)$$

где R – коэффициент корреляции предложенной модели.

Проанализировав результаты экспериментальных измерений значений уноса жидкости для тарелки новой конструкции, необходимо отметить стабильность работы тарелки в широком интервале скоростей по пару и незначительное увеличение доли уносимой жидкости. Сопоставление величины межтарельчатого уноса жидкости с клапанной тарелки новой конструкции с расчетными значениями величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами позволяет сделать вывод о превосходстве тарелки новой конструкции по данному параметру над тарелками с дисковыми клапанами.

Сопоставление эффективности массопередачи по газу. На новой конструкции тарелки также исследовали эффективность массопередачи при насыщении воздуха влагой. Эффективность при испарении жидкости определялась на системе воздух – вода с учетом влажности воздуха на входе x_{ex} , кг/м³, в колонну и выходе $x_{вых}$, кг/м³, из нее по формуле (4):

$$E = \frac{x_{вых} - x_{ex}}{x_{100} - x_{ex}}, \quad (4)$$

где x_{100} – абсолютная влажность воздуха, насыщенного водяным паром, кг/м³.

В данной работе исследовалась эффективность массопередачи новой конструкции тарелки по газу при насыщении воздуха влагой в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. При этом фактор скорости газа варьировался в пределах от 1,08 до 2,3 кг^{0,5}/(м^{0,5}·с), плотность орошения q изменялась в пределах от 8,6 до 15,5 м³/(м²·ч).

Анализ экспериментальных значений эффективности по газу тарелки новой конструкции показал:

- плотность орошения тарелки q значительно влияет на величину эффективности тарелки.
- С увеличением значения плотности орошения тарелки наблюдался рост эффективности тарелки;
- также на величину эффективности тарелки существенно влияет фактор скорости газа F_p .

С ростом фактора скорости газа эффективность тарелки увеличивается, при этом можно выделить два основных режима работы тарелки. Первый режим характеризуется существенным увеличением эффективности тарелки с ростом фактора скорости газа. Дальнейшее увеличение фактора скорости, после перехода в следующий режим работы тарелки, приводит к незначительному увеличению эффективности тарелки.

Для определения эффективности тарелки новой конструкции по газу предложена следующая математическая модель:

$$E_v = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 b_1 + b_3 \cdot F_p^3), \quad (5)$$

где E_v – эффективность тарелки по газу; q – плотность орошения тарелки, м³/(м²·ч); F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, кг^{0,5}/(м^{0,5}·с); b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Уравнение (5) предложено как уравнение общего вида для определения эффективности по газу для тарелки нового типа. Коэффициенты в данном уравнении находятся с помощью статистических методов для каждого отдельно взятого конструктивного исполнения тарелки. Регрессионный анализ данных для определения коэффициентов уравнения эффективности выполнен в программе Statistica.

Полученные зависимости величины эффективности тарелки от фактора скорости газа и интенсивности орошения тарелки нового типа для различных вариантов конструктивного исполнения колпачка новой тарелки приведены на рисунках 7–10.

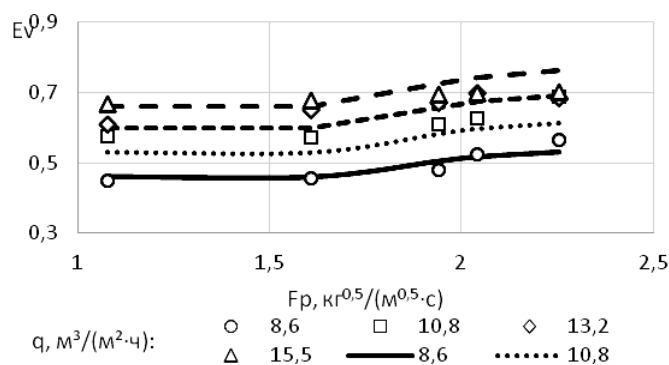


Рисунок 7. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 1-го колпачка

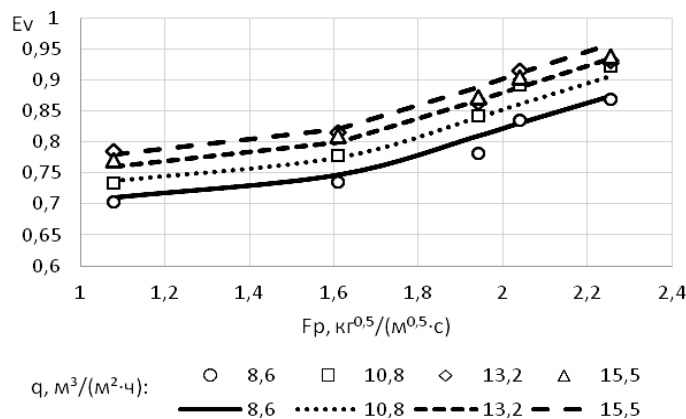


Рисунок 8. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 2-го колпачка

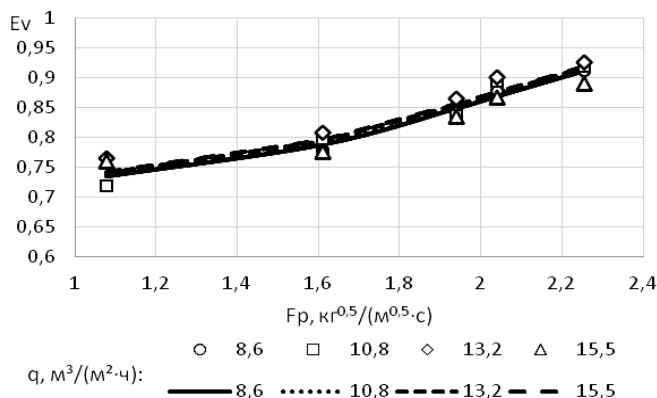


Рисунок 9. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 3-го колпачка

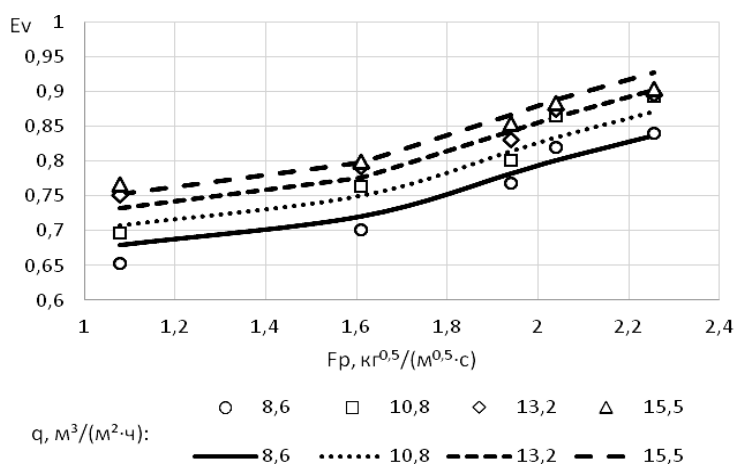


Рисунок 10. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 4-го колпачка

Анализ экспериментальных значений эффективности по газу тарелки новой конструкции показал, что плотность орошения тарелки (q) и фактор скорости газа (F_p) существенно влияют на величину эффективности тарелки. Установлено, что с увеличением их значений происходит рост эффективности массопередачи тарелки по газу.

Устойчивая работа усовершенствованной клапанной тарелки наблюдается в диапазоне изменения фактора скорости по газу (F_p) от 1,08 до 2,3 $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5}\cdot\text{с})$. При этом на тарелке возникает газо-жидкостная дисперсная система – пена, что соответствует пенному режиму работы тарелки. В указанном режиме контактирование газа и жидкости происходит на поверхности пузырьков и струй газа, а также на поверхности капель жидкости, которые в большом количестве образуются над барботажным слоем при выходе пузырьков газа из барботажного слоя и разрушении их оболочек. В пенном режиме поверхность контакта фаз на тарелке максимальна.

Результаты исследования показали высокие значения эффективности тарелки новой конструкции по газу. Эффективность разработанной клапанной тарелки достигает 94% при насыщении воздуха влагой, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88% [5, с. 258, рис. VII-22].

Сопоставление эффективности массопередачи по жидкости. На тарелке исследовали эффективность массопередачи при десорбции углекислого газа из воды воздухом. Концентрация углекислого газа в воде определялась значением рН воды с помощью эмпирического выражения (6):

$$X = 2,69 \cdot 10^{5-\text{pH}}. \quad (6)$$

Зависимость (6) для концентрации углекислого газа в воде от кислотности раствора в диапазоне рН 5...7 получена на основании обработки экспериментальных данных в работе [5].

Уравнение эффективности массопередачи по жидкости имеет вид:

$$E_{ML} = \frac{X_H - X_K}{X_H - X^*}. \quad (7)$$

В уравнении (7) X_H, X_K, X^* – концентрации CO_2 в воде, г/л, соответственно на входе на тарелку, на выходе из тарелки и в жидкости, равновесной со средним составом уходящего с тарелки воздуха Y_K .

Концентрацию углекислого газа в жидкости X^* , равновесной со средним составом уходящего с тарелки воздуха Y_K , определим по формуле

$$X^* = \frac{Y_K}{K}.$$

Здесь K – константа фазового равновесия углекислого газа, которая достаточно велика.

В специальной литературе приводятся значения для K , имеющие порядок 10^3 . Поэтому можно считать равновесную концентрацию X^* участвующего в массообмене углекислого газа в воде равной 0 и с достаточной степенью точности принять

$$E_{ML} = \frac{X_H - X_K}{X_H}. \quad (8)$$

Используя уравнение (6), формулу (8) можно переписать в виде:

$$E_{ML} = 1 - 10^{-(\text{pH}_K - \text{pH}_H)}, \quad (9)$$

где pH_H и pH_K – pH воды на входе и выходе с тарелки соответственно.

Уравнение (9) использовано при нахождении опытных значений эффективности тарелки по жидкости.

В работе исследовалась эффективность тарелки по жидкости при десорбции углекислого газа из воды воздухом в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. При этом фактор скорости газа варьировался в пределах от 1,08 до 2,3 $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$, плотность орошения q изменялась в пределах от 8,6 до 15,5 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

На основе анализа экспериментальных значений эффективности по жидкости тарелки новой конструкции сделаны следующие *выводы*:

1) плотность орошения тарелки q значительно влияет на величину эффективности тарелки. С увеличением значения плотности орошения тарелки наблюдалось снижение эффективности тарелки по жидкости;

2) существенное влияние на величину эффективности тарелки по жидкости оказывает также фактор скорости газа F_p . С ростом фактора скорости газа эффективность тарелки увеличивается. При этом также можно выделить *два основных режима работы тарелки*:

- при работе тарелки в первом режиме, или режиме саморегулирования, наблюдается значительный рост эффективности тарелки с увеличением фактора скорости газа, замедляющийся при приближении к значению фактора скорости газа, характерному для перехода во второй режим, в котором клапан находится в крайнем верхнем положении;

- при дальнейшем увеличении фактора скорости газа во втором режиме работы тарелки снова наблюдается значительное увеличение эффективности тарелки по жидкости. При этом данный рост эффективности тарелки во втором режиме работы пропорционален плотности орошения тарелки;

3) для тарелок с меньшим диаметром отверстий перфорации колпачка (вариант 1-го и вариант 3-го конструктивного исполнения) характерно снижение влияния плотности орошения тарелки на эффективность при увеличении фактора скорости газа.

На основе данных выводов для нахождения эффективности тарелки по жидкости предложена следующая математическая модель:

$$E_L = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 + b_3 \cdot F_p^3 + b_4 \cdot F_p^4), \quad (10)$$

где E_L – эффективность тарелки по жидкости; q – плотность орошения тарелки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$; b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии.

Уравнение (10) в данной работе предложено в качестве общего уравнения эффективности по жидкости для тарелки нового типа. Коэффициенты в уравнении (10) находятся с помощью статистических методов для каждого отдельно взятого конструктивного исполнения тарелки.

Регрессионный анализ данных для определения коэффициентов уравнения эффективности выполнен в программе Statistica.

С целью сопоставления массообменных характеристик клапанной тарелки новой конструкции и тарелки ПК построены совместные графики зависимостей эффективности тарелки от фактора скорости газа, представленные на рисунках 11–14.

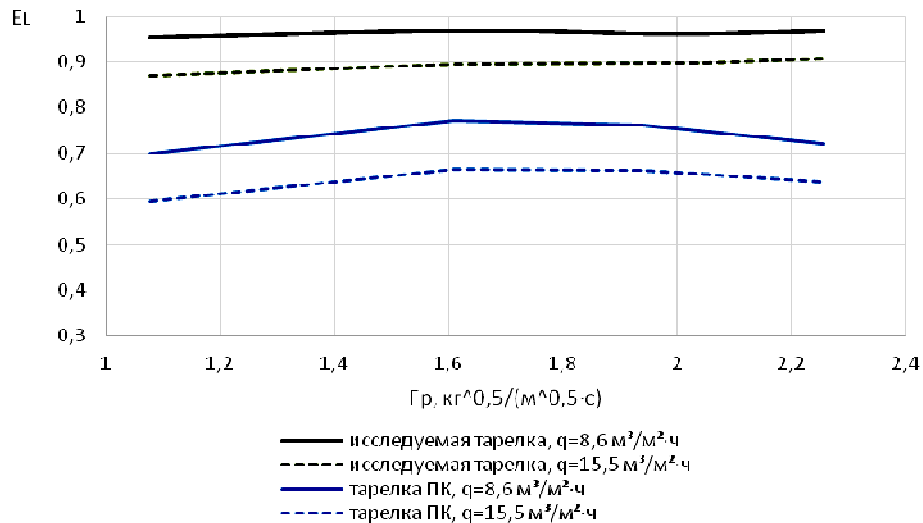


Рисунок 11. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 1-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

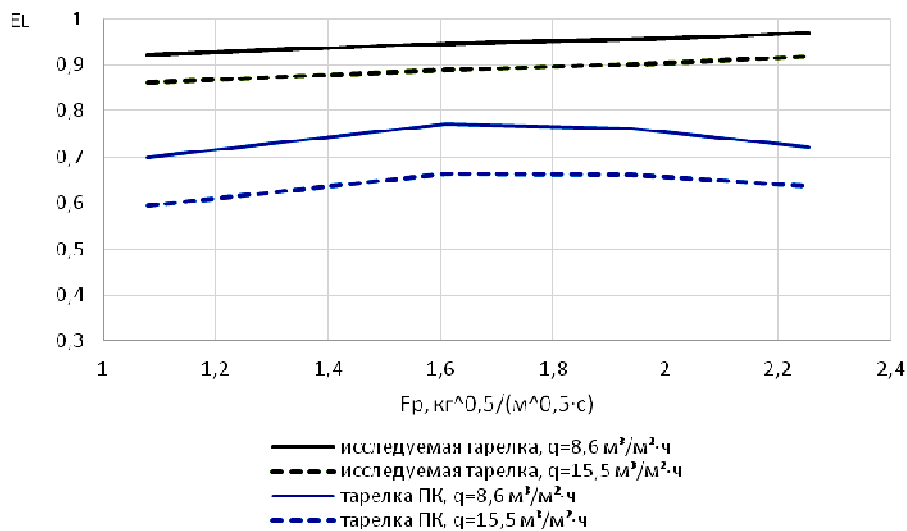


Рисунок 12. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 2-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

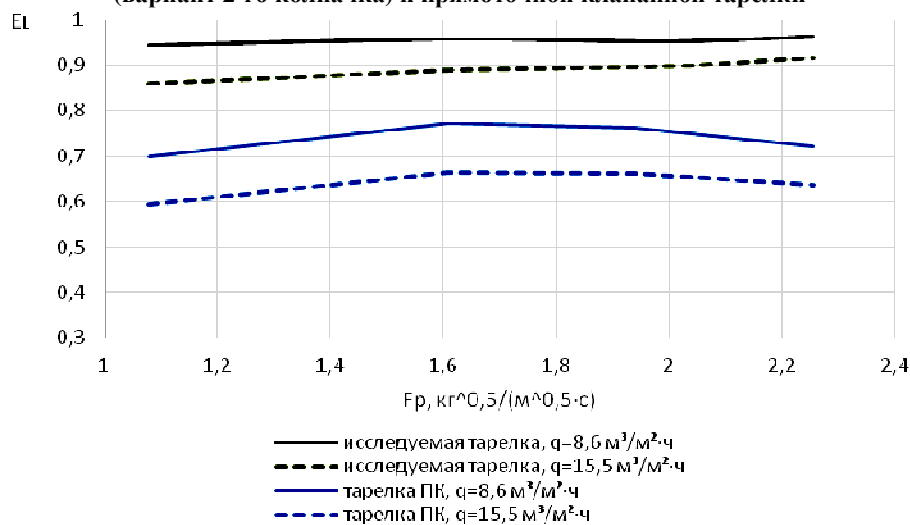


Рисунок 13. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 3-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

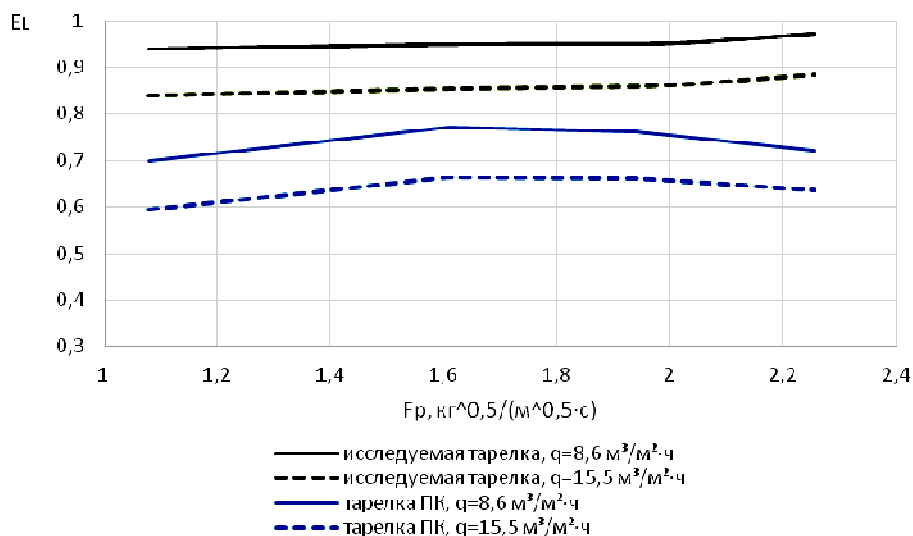


Рисунок 14. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 4-го колпачка) и прямооточной клапанной тарелки

Также построен график отношения эффективности исследуемой тарелки к эффективности тарелки прямооточной клапанной (рисунок 15). Ввиду относительно близких значений эффективности тарелок с различными вариантами колпачков для построения данного графика взяты усредненные значения эффективности для тарелок с четырьмя различными вариантами колпачков.

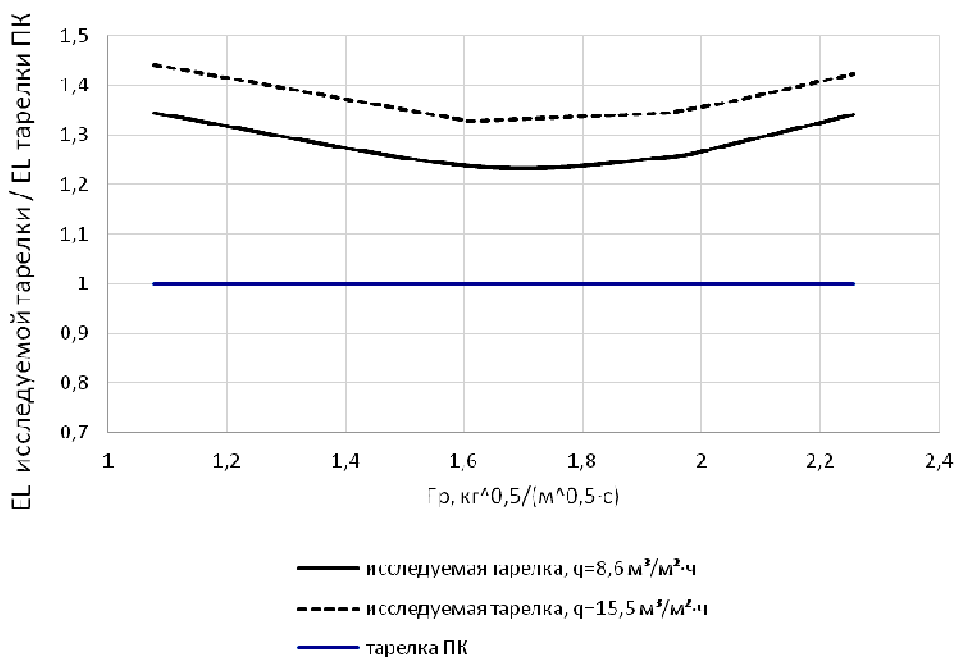


Рисунок 15. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции и прямооточной клапанной тарелки

Заключение. Эффективность клапанной тарелки новой конструкции по жидкости во всем исследуемом диапазоне изменения факторов (интенсивность орошения тарелки, фактор скорости газа) существенно превышает эффективность тарелки ПК:

- эффективность клапанной тарелки новой конструкции при интенсивности орошения $q = 8,6 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ в 1,24...1,35 раза выше, чем интенсивность тарелки ПК;

- эффективность клапанной тарелки новой конструкции при интенсивности орошения $q = 15,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ в 1,33...1,45 раза выше, чем интенсивность тарелки ПК.

Эффективность разработанной клапанной тарелки по газу достигает 94%, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88%.

На основе результатов проведенных исследований массообменных характеристик клапанной тарелки новой конструкции получены математические модели, описывающие зависимости эффективности тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. Все исследования проведены для четырех различных вариантов конструктивного исполнения колпачков тарелки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и аппараты химических производств / И.И. Поникаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 368 с.
2. Тарелка клапанная : полез. модель ВУ 10370 / В.Б. Халил, Майтам Джабар Наджим. – Оpubл. 30.10.2014.
3. Ларькин, А.В. Исследование гидродинамики и массопередачи на прямооточной клапанно-ситчатой тарелке новой конструкции : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Ларькин. – М., 2014.
4. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки / Е.Н. Судаков [и др.]. – М. : Химия, 1979. – 569 с.
5. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А.И. Скобло [и др.]. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

Поступила 11.07.2017

MAIN CHARACTERISTICS COMPARISON OF VALVE PLATE OF NEW DESIGN AND DIRECT VALVE PLATE

D. MAITAM

A new design of the valve plate is presented. The results of experimental studies and a comparative analysis of the basic performance characteristics of a new design plate are presented: mass transfer efficiency and interfinal liquid drift with the existing analog. Studies have been carried out for four different versions of the design of the tray caps. It is concluded that the valve plate of the new design is characterized by improved mass exchange and hydrodynamic characteristics in comparison with the direct flow. Mathematical models are obtained that describe the dependence of the efficiency of the plate on the gas velocity factor and the irrigation density of the plate.

Keywords: *valve plates and direct flow; disc valves; caps; working characteristics, comparative analysis.*

УДК 628.31

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ И ВОДООТДАЮЩИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ АКТИВНОГО ИЛА**И.Э. ГОЛОВНЕВ***(Витебскводоканал);***канд. техн. наук, доц. В.Н. МАРЦУЛЬ***(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

Представлены результаты исследований влияния ультразвуковой обработки на седиментационные и водоотдающие свойства суспензий активного ила. В качестве объекта исследований рассмотрены суспензия активного ила, а также жидкая и твердая фазы (кек и фугат) обработанной суспензии в ультразвуковых установках с пьезоэлектрическим и гидродинамическим излучателями. Дана оценка эффективности ультразвуковой обработки по изменению дисперсного состава и времени капиллярного впитывания иловых суспензий, а также седиментационных характеристик глинистых суспензий.

Ключевые слова: *суспензия активного ила, седиментационные характеристики, водоотдающие свойства, ультразвуковые установки, эффективность ультразвуковой обработки.*

Введение. Очистные сооружения канализации – важнейший элемент инженерной инфраструктуры населенного пункта, от эффективности функционирования которого зависит не только устойчивая работа всех систем жизнеобеспечения, но и состояние водных объектов, в которые сбрасываются сточные воды после очистки. Одной из актуальных проблем, решение которой будет способствовать обеспечению надлежащего состояния водных объектов, является повышение эффективности функционирования очистных сооружений канализации, которые являются основными источниками поступления в водные объекты разнообразных загрязняющих веществ.

Известно большое число разработанных и реализованных на практике технических и технологических решений, которые обеспечивают соблюдение жестких требований по содержанию в очищенных сточных водах загрязняющих веществ, использование осадков. Однако все они требуют значительных капитальных вложений и не всегда применимы в условиях действующих очистных сооружений. В последнее время в технологии очистки сточных вод находит применение ультразвуковая обработка, оказывающая комплексное воздействие на дисперсные системы и растворы различного состава, что позволяет интенсифицировать процессы диспергирования, фазового разделения, химические реакции в жидких средах различного состава [1].

Как следует из анализа практики применения ультразвука в технологии очистки сточных вод [2], ультразвуковая обработка может оказывать комплексное воздействие на суспензию активной биомассы: изменяет дисперсный состав и состав фаз суспензии, воздействует на процессы жизнедеятельности микроорганизмов, разрушая тем самым их клетки.

В зависимости от решаемых задач необходимо выбрать соответствующие условия обработки, которые обеспечивают получение требуемого результата (эффекта). В технологии биологической очистки сточных вод известно применение ультразвуковой обработки в основном для обработки осадков с целью повышения выхода биогаза и интенсификации анаэробного сбраживания [3; 4]. Цель такой обработки состоит в максимальной дезинтеграции биомассы с целью перевода внутриклеточного вещества микроорганизмов в жидкую фазу. Поэтому основным критерием, который используется для оценки эффективности такой обработки, является прирост показателя ХПК (химическое потребление кислорода) жидкой фазы иловой суспензии. При этом хороший эффект достигается за счет использования достаточно мощных источников ультразвука и/или длительной обработки.

При использовании ультразвуковой обработки для интенсификации процессов биологической очистки требуется определить условия ультразвуковой обработки, которые бы влияли на активность биомассы, изменяли состав фаз иловых суспензий в нужном направлении, способствовали более полному разделению фаз в процессах первичного и вторичного отстаивания, но не приводили к потере их жизнеспособности. Известно, что ультразвуковая обработка оказывает влияние на седиментационные и водоотдающие свойства иловых суспензий [5; 6], что может быть использовано для повышения эффективности первичного отстаивания и уменьшения количества избыточного активного ила. Такое влияние обусловлено тем, что при ультразвуковой обработке в жидкую фазу переходят как внеклеточные, так и при определенной интенсивности обработки внутриклеточные полимеры, которые способствуют флокуляции иловых суспензий [7–11].

Однако результаты ранее проведенных исследований трудно сопоставимы по причине использования различных показателей, характеризующих режим ультразвуковой обработки, применения источ-

ников ультразвука с различными частотными характеристиками. Исследователи часто приходят к прямо противоположным выводам в части влияния ультразвуковой обработки на седиментационные и водоотдающие свойства иловых суспензий [6; 12]. Чаще всего предметом исследований является изменение дисперсного состава иловых суспензий, а не их флокулирующие свойства. В то же время использование флокулирующих свойств иловых суспензий позволяет повысить эффективность механической очистки сточных вод без применения коагулянтов и флокулянтов. Известно, что флокулирующими свойствами обладает и необработанная суспензия активного ила. Однако их практическое использование явно недостаточно, так как флокулирующие свойства проявляются при чрезмерно больших расходах.

Учитывая характер действия ультразвуковой обработки на многофазные системы, интерес в плане активации флокулирующих свойств представляет изучение влияния обработки малой интенсивности на иловые суспензии.

Цель исследований – определение условий ультразвуковой обработки иловых суспензий, обеспечивающих улучшение седиментационных и водоотдающих свойств и повышение за счет этого эффективности очистки сточных вод от взвешенных веществ.

В качестве объекта исследований рассматривались иловые суспензии, которые отбирали на Минской очистной станции (МОС) и очистных сооружениях УП «Витебскводоканал» в период 2009–2015 годов. Учитывая, что состав активного ила, как и состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения, подвержен определенным изменениям, работу проводили на образцах активного ила, отобранных в различные периоды времени: март – апрель; июнь – июль; сентябрь – октябрь; декабрь – январь.

Методы исследований. Ультразвуковую обработку суспензий активного ила проводили на установках, отличающихся типом излучателя.

Ультразвуковую обработку с использованием пьезоэлектрического излучателя проводили на установке производства фирмы «ИНЛАБ» (Россия) ИЛ 100-6/1 (максимальная мощность 630 Вт с возможностью ступенчатого регулирования в диапазоне 315...630 Вт, рабочая частота – $22 \pm 10\%$ кГц) и установке типа УЗДН-2Т (рабочая частота $22 \pm 10\%$ кГц).

Ультразвуковую обработку с использованием гидродинамического излучателя проводили на установке циркуляционного типа. Роль гидродинамического излучателя (кавитатора) выполняют два струйных устройства в виде сопла Вентури. Соппротивление кавитатора $\Delta P = 20$ кПа, насос марки Х50-32-125 (подача – $12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор – 20 м).

Для корректного сравнения эффективности двух вариантов ультразвуковой обработки использовали удельный расход энергии (E , Дж/г) [13]:

- для пьезоэлектрического излучателя

$$E_a = \frac{NT}{V_a C}; \quad (1)$$

- для гидродинамического излучателя

$$E_r = \frac{PBT}{V_r C}, \quad (2)$$

где N – мощность излучателя, Вт; T – продолжительность обработки, с; V_a – объем суспензии, обрабатываемой пьезоэлектрическим излучателем, дм^3 ; C – концентрация суспензии, $\text{г}/\text{дм}^3$; P – гидравлическое сопротивление струйного устройства, Па; B – объемный расход иловой суспензии, $\text{м}^3/\text{с}$; V_r – объем суспензии, обрабатываемой в установке с гидродинамическим излучателем, дм^3 .

Для определения уровня интенсивности обработки использовали показатель ультразвуковой мощности ($\text{Вт}/\text{см}^3$), который рассчитывали делением мощности излучателя на объем обрабатываемой суспензии [14].

Для характеристики водоотдающих свойств иловых суспензий использовали такой показатель, как время капиллярного впитывания (ВКВ), определяемый на оригинальном приборе, разработанном в БГТУ [15].

Седиментационный анализ проводили согласно [16] с использованием торзионных весов WT1000 (Польша) с пределом взвешивания 1000 мг. Конструкцию весов доработали с целью проведения взвешивания чашки, помещенной в емкость с суспензией активного ила, расположенную под весами.

Оценивали флокулирующие свойства обработанных иловых суспензий методом пробного коагулирования на модельных сточных водах с содержанием взвешенных веществ (глина) 200, 500 и 1000 $\text{мг}/\text{дм}^3$ и сточных водах, отобранных после песколовков на очистных сооружениях. Пробное коагулирование проводили на установке Flocculator 2000 (фирма Kemira). Для выбранных расходов иловых суспензий исследовали кинетику осаждения на осадительной колонне высотой 500 и диаметром 50 мм (глубина слоя отстаивания 300 мм). О содержании взвешенных веществ в жидкой фазе судили по показателю мутности,

который определяли на колориметре КФК-2МП при длине волны 540 нм. Разделение обработанных иловых суспензий на кек и фугат проводили центрифугированием в течение 5 минут при 5000 мин^{-1} .

Результаты и обсуждение. Учитывая особенности состава суспензий активного ила, дисперсная фаза которого представлена как твердыми частицами различного состава, так и простейшими, и бактериями, образующими сложные агрегаты – флокулы, при оценке дисперсного состава не ставили цель определить истинный размер частиц обработанного активного ила. Изменение дисперсного состава оценивали по кривым седиментации, полученным для необработанной и обработанной ультразвуком иловых суспензий с начальной концентрацией $6,2 \text{ г/дм}^3$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

С увеличением времени ультразвуковой обработки (энергозатрат на обработку) закономерно изменяется дисперсный состав иловой суспензии в сторону увеличения доли частиц меньших размеров, которые осаждаются в течение более длительного времени. Иловая суспензия становится более однородной.

На рисунке 1 представлены кривые седиментации активного ила в зависимости от времени ультразвуковой обработки (интенсивность обработки 2 Вт/см^3).

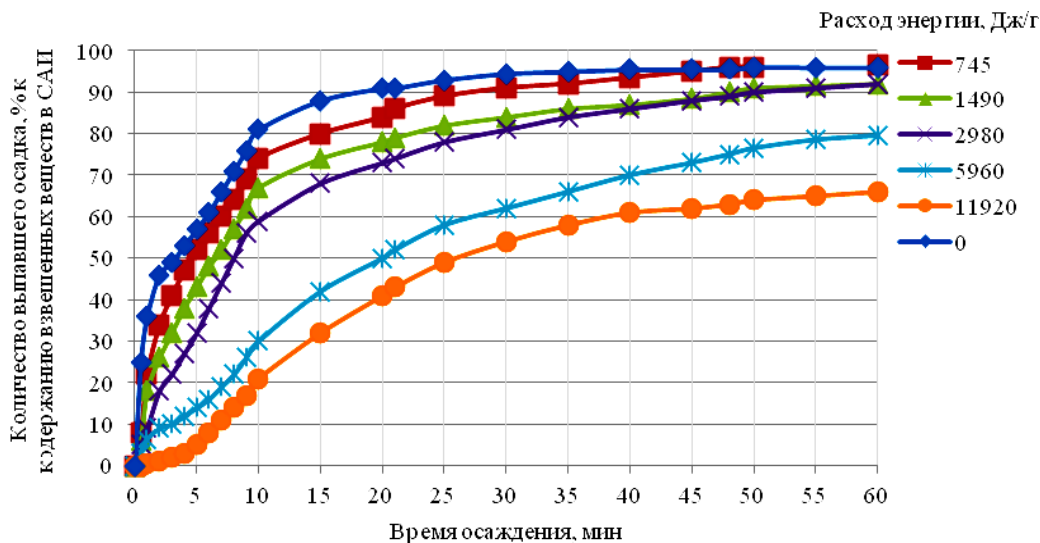


Рисунок 1. – Кривые седиментации обработанной ультразвуком суспензии активного ила

С увеличением времени ультразвуковой обработки (энергозатрат на обработку) закономерно изменяется дисперсный состав иловой суспензии в сторону увеличения доли частиц меньших размеров, которые осаждаются в течение более длительного времени. Иловая суспензия становится более однородной.

На рисунке 2 представлена диаграмма, иллюстрирующая изменение дисперсного состава иловой суспензии в процессе ультразвуковой обработки.

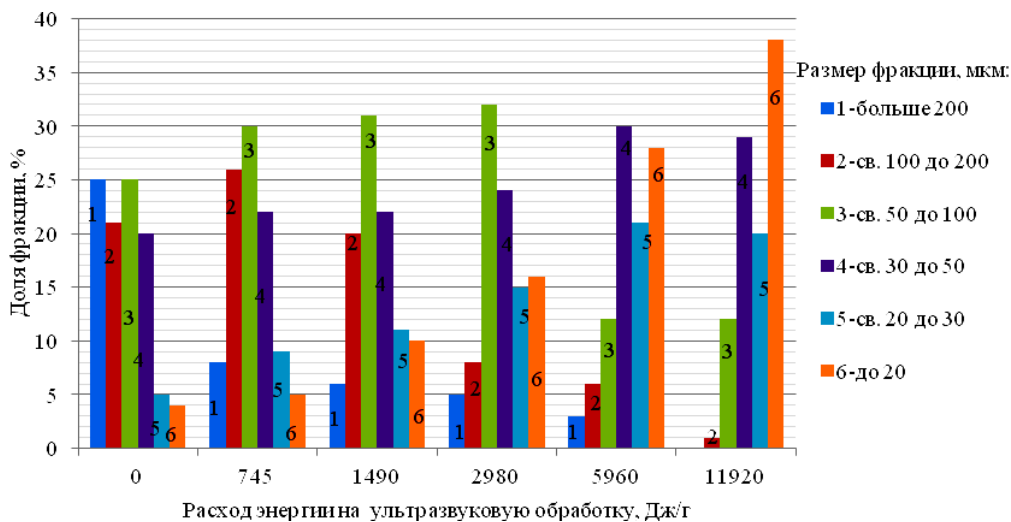


Рисунок 2. – Изменение состава дисперсной фазы активного ила в зависимости от времени ультразвуковой обработки (энергозатрат)

Для построения диаграммы дисперсные частицы, осаждающиеся на чашке торзионных весов, разделены условно на 6 фракций в зависимости от времени осаждения. Размеры фракций r , соответствующие времени полного осаждения частиц определенных размеров, определяли по уравнению

$$r = (KH/\tau)^{0.5}, \quad K = 9\mu/2g(\rho - \rho_0), \quad (3)$$

где H – высота столба жидкости (100 мм); μ – вязкость жидкости, Па·с; $\rho - \rho_0$ – разности плотностей твердой и жидкой фаз суспензии, кг/м³; g – ускорение свободного падения; τ – время осаждения, с.

Для условий поведения седиментационного анализа частицы с размерами свыше 200 мкм осаждаются в течение 0,5 минут; от 200 до 100 мкм – в интервале от 0,5 до 2 мин; от 50 до 100 мкм – в интервале от 2 до 8 мин; от 30 до 50 мкм – в интервале от 8 до 21 мин; от 20 до 30 мкм – в интервале от 21 до 48 мин; менее 20 мкм – свыше 48 мин. Так как иловая суспензия характеризуется достаточно высокой концентрацией дисперсной фазы, частицы суспензии при осаждении взаимодействуют друг с другом, а скорость их осаждения изменяется. Это значит, что условие, при котором выполняется закон Стокса и возможно определение дисперсного состава суспензии по результатам седиментационного анализа, не выполняется. Кроме этого, вероятно, имеет место вторичная флокуляция частиц дисперсной фазы иловой суспензии с участием внеклеточных полимеров, выделяющихся в водную фазу в процессе ультразвуковой обработки. Поэтому приведенные выше значения являются ориентировочными, но позволяют оценить изменение дисперсного состава.

Показатель ВКВ характеризует способность суспензий отдавать (удерживать) воду и используется для оценки способности к обезвоживанию наряду с показателем удельного сопротивления осадка. В отличие от показателя ВКВ, удельное сопротивление осадка характеризует водоотдающую способность непосредственно после обработки суспензии (осадка), что позволяет избежать вторичной флокуляции, которая может оказывать влияние на результаты определения.

Исследования проводились на иловой суспензии (6,2 г/дм³), обработанной на установках с пьезометрическим и гидродинамическим излучателями. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость показателя ВКВ от энергозатрат на ультразвуковую обработку суспензии активного ила

Объект исследования	Энергозатраты, Дж/г	ВКВ, с
Исходный активный ил	0	293
Активный ил, обработанный на установке с гидродинамическим излучателем	347	270
	694	285
	1735	386
	3470	400
	5205	449
Активный ил, обработанный на установке с пьезометрическим излучателем	745	269
	1490	288
	2980	356
	5960	405
	11920	450

Чем ниже показатель ВКВ, тем лучше иловая суспензия отдает воду. Следовательно, ультразвуковая обработка малой интенсивности при низких энергозатратах способствует выделению в жидкую фазу внеклеточных полимеров, которые способствуют формированию новой структуры хлопьев активного ила, характеризующихся лучшими водоотдающими свойствами. Причем минимальное значение ВКВ при обработке иловой суспензии на установке с гидродинамическим излучателем достигается при меньших энергозатратах в сравнении с пьезоэлектрическим излучателем.

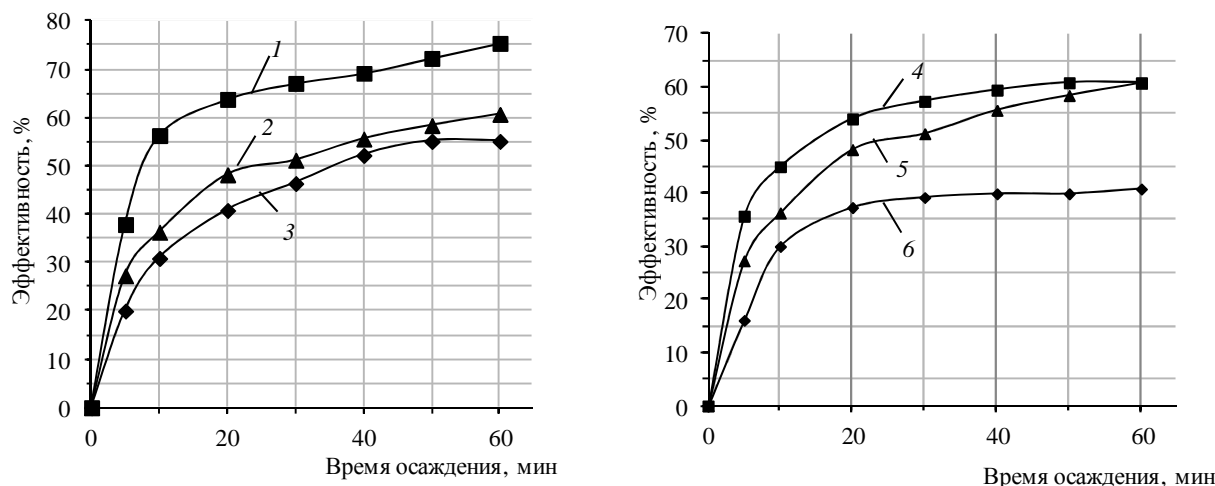
Повторение эксперимента на иловой суспензии концентрацией 9,2 г/дм³ не подтвердило положительное влияние ультразвуковой обработки на показатель ВКВ. В то же время обработка иловых суспензий в диапазоне концентраций 5...7 г/дм³ показала, что при энергозатратах в диапазоне 700...1500 Дж/г в зависимости от типа излучателя достигается уменьшение показателя ВКВ.

Таким образом, при использовании ультразвуковой обработки низкой эффективности следует ожидать повышения флокулирующих свойств суспензии активного ила, что может найти применение при механической очистке сточных вод для повышения эффективности.

Для оценки флокулирующих свойств проводили пробное коагулирование глинистых суспензий с концентрацией 200, 500 и 1000 мг/дм³. Оценку флокулирующих свойств проводили для суспензии активного ила (САИ), подвергнутой ультразвуковой обработке, а также для фугата и кека, полученных путем разделения обработанной суспензии центрифугированием. Доза составляла 1...3% об. (определили по результатам пробного коагулирования для расходов в диапазоне 1...10% об.). Дальнейшее увеличение дозы не приводит к интенсификации осаждения частиц суспензии в результате того, что увеличивается количество взвешенных веществ, поступающих с САИ, и эффект флокуляции не компенсирует его.

В глинистую суспензию добавляли САИ, фугат или кек, смесь отстаивали и через определенные промежутки времени контролировали содержание взвешенных веществ в жидкой фазе на определенной глубине. Параллельно отдельно отстаивали глинистую суспензию и подвергнутую ультразвуковой обработке суспензию активного ила, что позволило оценить наличие или отсутствие флокулирующего действия. Эксперимент повторяли многократно (более 20 серий), используя суспензии с различной концентрацией дисперсной фазы.

Установлено, что скорость совместного осаждения взвешенных частиц глинистых суспензий и 1...3% об., САИ или кека на 17...20% выше, чем для каждой в отдельности. Скорость осаждения и степень очистки при отстаивании в течение 60 мин зависит от концентрации взвешенных веществ в глинистой суспензии и с ее увеличением уменьшается. При концентрации глинистой суспензии 500 г/дм³ она составляет 10...15%, а для концентрации 1000 г/дм³ – 0...3%. В качестве примера на рисунке 3 представлены графики зависимости эффективности осаждения САИ (6,2 г/дм³, гидродинамический излучатель, расход энергии 610 Дж/г) и глинистой суспензии.



1 – САИ + суспензия глины 200 мг/л; 2 – САИ; 3 – суспензия глины 200 мг/л;
4 – САИ + суспензия глины 1000 мг/л; 5 – САИ; 6 – суспензия глины 1000 мг/л

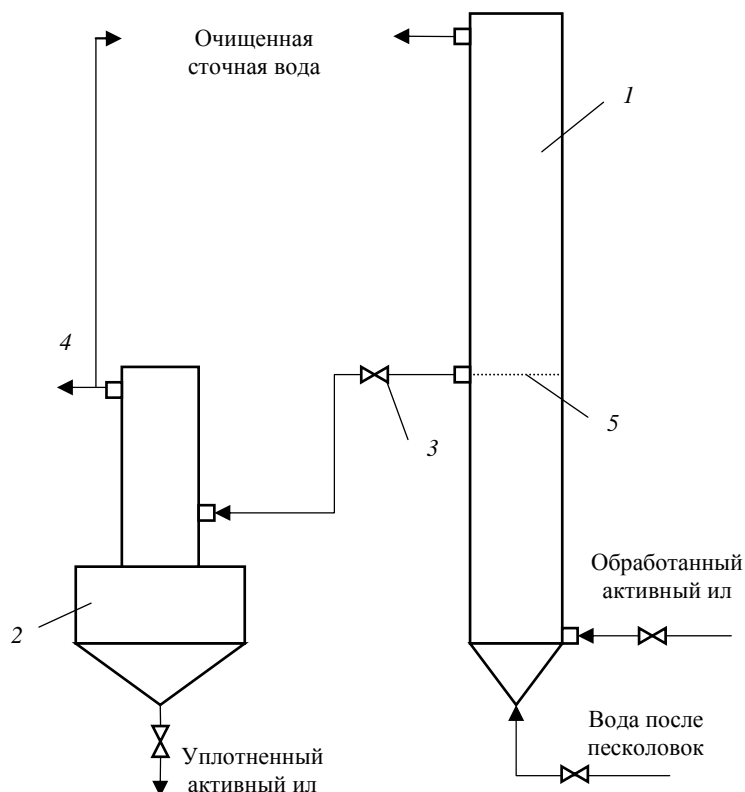
Рисунок 3. – Осаждение глинистой суспензии и САИ

Использование фугата обработанной ультразвуком иловой суспензии для осаждения глинистых суспензий не дало ожидаемого результата. Небольшой положительный эффект (увеличение степени очистки на 7%) наблюдался лишь для суспензии 1000 мг/дм³. При использовании фугата АИ эффективность осаждения взвешенных веществ несколько повышается только при высоких концентрациях суспензии. Так, при совместном отстаивании фугата и суспензий концентрацией 200 и 1000 мг/дм³ эффективность очистки уменьшается соответственно на 20 и 10% в сравнении с эффективностью свободного осаждения суспензий, а эффективность осаждения суспензии 1000 мг/дм³ увеличивается на 7% в сравнении с эффективностью осаждения исходной суспензии.

Эффективность использования обработанной ультразвуком САИ подтверждена на сточных водах Минской очистной станции (концентрация взвешенных веществ 288 мг/дм³) и очистных сооружений УП «Витебскводоканал» (концентрация взвешенных веществ 152 мг/дм³).

Учитывая, что при ультразвуковой обработке иловой суспензии наблюдается переход внеклеточных полимеров в жидкую фазу, а в сточных водах, поступающих на очистные сооружения канализации, концентрации взвешенных веществ недостаточно для достижения режима стесненного осаждения, характеризующегося большей эффективностью, в условиях очистных сооружений УП «Витебскводоканал» проведены исследования очистки во взвешенном слое осадка с использованием обработанной ультразвуком иловой суспензии.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.



1 – осветлитель (высота 300, диаметр 10 см); 2 – илоуплотнитель (диаметр 19, высота 120 см);
3 – кран; 4 – отбор проб осветленной воды; 5 – верхний уровень взвешенного слоя активного ила

Рисунок 4. – Схема установки очистки сточных вод во взвешенном слое осадка

В исследованиях использовали сточную воду, отобранную из распределительной камеры песколовки, и суспензию активного ила, отобранную после вторичных отстойников УП «Витебскводоканал». Обработанную суспензию активного ила и сточную воду подавали в осветлитель насосами с расходами 2,4...2,6 и 22,3...22,8 дм³/ч соответственно. Высота взвешенного слоя осадка составляла 80...120 см и регулировалась с помощью крана 3 путем отведения избытка осадка в илоуплотнитель. Отбор проб осветленной сточной воды проводили после достижения заданной высоты взвешенного слоя. Установлено, что при осветлении сточных вод во взвешенном слое осадка с расходом САИ в диапазоне 8...12% об. к сточной воде, поступающей на механическую очистку, степень очистки по взвешенным веществам увеличивается до 80...92% с 60% без использования САИ.

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка при энергозатратах в диапазоне 700...1500 Дж/г для пьезоэлектрического и гидродинамического излучателей позволяет усилить флокулирующие свойства иловых суспензий, использование которых позволяет интенсифицировать процесс очистки сточных вод от взвешенных веществ.

Обработку ультразвуком малой интенсивности целесообразно использовать на очистных сооружениях канализации для увеличения степени очистки от взвешенных веществ и производительности оборудования механической очистки сточных вод.

Показано, что ультразвуковая обработка при расходе энергии до 1500 Дж/г твердой фазы способствует увеличению флокулирующих свойств иловой суспензии. Расход обработанных ультразвуком иловых суспензий, обеспечивающий повышение степени очистки, для гравитационного осаждения составляет 1...3% об., для осветления во взвешенном слое – 8...12% об.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, Fen Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration / Fen Wang, Yong Wang, Min Ji // Journal of Hazardous Materials. – 2005. – Vol. 123, № 8. – P. 145–150.

2. Ultrasonic pretreatment of sludge : A review / Sridhar Pilli [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2011. – Vol. 18, № 1. – P. 1–18.
3. Clark, P.B. Ultrasonic sludge pretreatment for enhanced sludge digestion / P.B. Clark // *Water and Environ. Manag.* – 2000. – Vol. 14, № 1. – P. 66–71.
4. Zielewicz-Madej, E. Zastosowanie dezintegracji ultradźwiękowej do intensyfikowania produkcji lotnych kwasów tłuszczowych z osadu wtornego / E. Zielewicz-Madej // *Inz. i ochr. srod.* – 2001. – Vol. 4, № 2. – S. 231.
5. Seungmin, Na Physicochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment / Na Seungmin, Young-Uk Kim, Jeehyeong Khim // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2007. – Vol 14, № 3. – P.281–285.
6. Xin Feng, Jinchuan Deng, Hengyi Lei, Tao Ba, Qingjuan Fan, Zhaoxu Li. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning // *Bioresource Technology*. – 2009. – Vol. 100, № 3. – P. 1074–1081.
7. Effect of ultrasound pretreatment in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with emphasis on naphthalene and pyrene removal / T.B. El-Hadj [et al.] // *Water Res.* – 2007. – Vol. 41, № 1. – P. 87–94.
8. Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs / F. Jorand [et al.] // *Water Res.* – 1995. – Vol. 29, № 7. – P. 1639–1647.
9. Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor / E. Gonze [et al.] // *Chem. Eng. Process.* – 2003. – Vol. 42, № 12. – P. 965–975
10. Forster, C.F. Flocculating agents of microbial origin / C.F. Forster, N.J.B. Knight, D.A.J. Wase // *Adv. Biotechnol. Prog.* – 1985. – Vol. 2, № 1. – P. 211–240.
11. Vallom, J.K. Lysis as a factor in sludge flocculation / J.K. Vallom, A.J. McLoughlin // *Water Res.* – 1984. – Vol. 18, № 12. – P. 1523–1528.
12. Dewil, R. Ultrasonic treatment of waste activated sludge / R. Dewil, J. Baeyens, R. Goutvriend // *Environ. Progress.* – 2006. – Vol. 25, № 2. – P. 121–128.
13. Physical and chemical characteristics of waste activated sludge treated ultrasonically / X. Feng [et al.] // *Chem. Eng. Process.* – 2009. – Vol. 48, № 1. – P. 187–194.
14. Ultrasound waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization / A. Tiehm [et al.] // *Water Res.* – 2001. – Vol. 35, № 8. – P. 2003–2009.
15. Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения, его реализующие : пат. ВУ 8807 / И.О. Оробей [и др.]. – Оpubл. : 30.03.2005.
16. – Фролов, Ю.Г. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии. – М. : Химия, 1986. – 216 с.

Поступила 28.07.2017

INFLUENCE OF ULTRASONIC TREATMENT ON SEDIMENTATION AND WETHEATING PROPERTIES OF SUSPENSIONS OF ACTIVE SLUDGE

I. HOLOVNEV, V. MARTSUL

The results of investigations of the influence of ultrasonic treatment on the sedimentation and water-release properties of suspensions of active sludge are presented. The object of the study was a slurry of activated sludge, as well as liquid and solid phases (cake and fugate) of an ultrasonically treated suspension with ultrasonic installations with piezoelectric and hydrodynamic radiators. The efficiency of the ultrasonic treatment was evaluated by the change in the disperse composition and the time of capillary absorption of the slurry, as well as the sedimentation characteristics of the clay suspensions.

Keywords: *suspension of the activated sludge, sedimentation characteristics, water yield properties, ultrasonic devices, the efficiency of ultrasonic treatment.*

УДК 628.16

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПРОМЫВНЫХ ВОД СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ
ПРИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ ОТ ЖЕЛЕЗА**

*канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО; Е.В. ЛЕСОВИЧ
(Полоцкий государственный университет);
В.Э. САМУЙЛО; Е.В. ШАДУРО
(Витебскводоканал)*

Рассмотрены особенности применения биологического метода обезжелезивания воды в открытых скорых фильтрах с песчаной загрузкой, схемы обработки промывных вод. Приведены результаты исследований по оценке состава промывных вод. Выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: водоснабжение, обезжелезивание воды, открытые скорые фильтры, песчаная загрузка, промывные воды, состав.

Общая характеристика биологического метода. Основным показателем состава подземных вод, не соответствующим нормативам для воды хозяйственно-питьевого водоснабжения (СанПиН 10-124-99) в большинстве населенных пунктов Республики Беларусь, является концентрации общего железа, преимущественно в закисных формах $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, обладающих слабо выраженными амфотерными свойствами. Если наблюдаются сравнительно высокие значения цветности, хотя и не превышающие требуемую норму, это косвенно указывает на наличие в исходной воде концентраций гуматов железа. В то же время в подземных водах могут часто присутствовать, обычно в сравнительно малых концентрациях, марганец, а также различные растворенные газы, что усложняет процессы удаления железа [1–3].

Содержание соединений железа в природной воде в концентрациях, превышающих нормативные (до 0,3 мг/л), делает ее непригодной для хозяйственно-питьевого водоснабжения и использования в технологических процессах некоторых отраслей производства, преимущественно пищевой промышленности.

Выбор того или иного метода обработки природной воды, содержащей соединения железа, зависит от их количества и формы существования, качественного состава воды, производительности водочистных сооружений и рекомендуется, прежде всего, на основании технологических изысканий непосредственно у источника водоснабжения.

При решении вопросов обезжелезивания воды необходимо знать условия перехода закисного и окисного железа из растворенного состояния в осадок с образованием соответственно гидрата закиси и гидрата окиси железа.

В практике обезжелезивания подземных вод на станциях обезжелезивания и установках преимущественное распространение получили аэрационные методы, в основном **метод упрощенной аэрации** с последующим фильтрованием. Для безнапорного варианта упрощенная аэрация и обогащение воды кислородом происходит с помощью воронки или перфорированного лотка при ее изливе с высоты от 0,5 до 1,0 м в центральный (боковой) канал скорого фильтра. При аэрации может происходить удаление незначительных концентраций растворенных газов, прежде всего сероводорода и аммиака. Отсутствие специальных аэрационных устройств и отдельных контактных емкостей (градирен, дегазаторов) упрощает эксплуатацию и снижает стоимость очистки. Метод упрощенной аэрации рекомендуется применять при определенном составе подземных вод [1; 4; 5]. При этом в скором фильтре после аэрации могут протекать одновременно или с отдельным преимуществом физико-химические и биологические процессы. Следовательно, этот метод будем рассматривать как основу для функционирования физико-химических и биологических процессов обезжелезивания воды.

Физико-химические процессы основаны на способности воды, содержащей двухвалентное железо и растворенный кислород, при фильтровании через зернистый слой выделять железо на поверхности зерен, образуя каталитическую пленку из ионов и окислов двух- и трехвалентного железа. На зернах фильтрующего слоя одновременно происходят реакции окисления и гидролиза. Обезжелезивание воды в покрытой пленкой загрузке – гетерогенный автокаталитический процесс, обеспечивающий непрерывное обновление пленки как катализатора непосредственно при работе фильтра. Предпочтительно для интенсивного образования и действия пленки наличие в воде кислорода было более 1,5 мг O_2 /л, причем значительные колебания его концентрации недопустимы.

В Республике Беларусь биохимические технологии очистки подземных вод с использованием микроорганизмов биологически активной загрузки, состоящей, прежде всего, из различных видов железомарганцевых бактерий, начали развиваться в 90-х годах прошлого века. Впоследствии этот метод получил развитие как в реконструкции существующих станций напорного и безнапорного типа, так и в строительстве новых и является одним из современных направлений, повышающих эффективность удаления железа в присутствии незначительных концентраций марганца и растворенных газов в скорых фильтрах.

Основные положения по ведению биологических методов и технологии обезжелезивания при обработке подземных вод, изложены в научных трудах [3; 6–9].

Применение биологического способа извлечения железа из воды предусматривает окисление растворенного железа Fe (II) до Fe (III) при помощи железомарганцевых бактерий, функционирующих в непрерывном режиме. То есть при прохождении воды через слой носителя содержащееся в ней двухвалентное железо под воздействием бактерий превращается в нерастворимые соединения трехвалентного железа, которые совместно с отмирающими бактериями выпадают в осадок или задерживаются как на поверхности, так и в фильтрующей загрузке. У типичных представителей родов *Leptothrix*, *Metallogenium*, *Siderocapsa* и др., развивающихся в пресных водах с нейтральной или слабощелочной средой, окисление железа и марганца происходит в результате взаимодействия выделяющейся перекиси водорода с ионами металлов (перекисный механизм). Активная реакция воды pH и окислительно-восстановительный потенциал Eh могут оказывать существенное влияние на развитие железобактерий, поэтому при использовании биотехнологий необходимо контролировать стабильность воды, что обычно не предусмотрено на станциях обезжелезивания воды.

Одновременно происходят и физико-химические процессы, в основе которых лежит процесс сорбции, включающий механизм связывания соединений металлов внеклеточными экзополимерами с образованием биопленок, слизистых чехлов, капсул, нитей. При этом механизм накопления оксидов железа включает в себя процессы как биологической природы (окислительные), так и небиологической (сорбционные).

При длительной эксплуатации фильтра, образуется биологически активная загрузка достаточной толщины, при которой роль биологических процессов возрастает с накоплением биомассы на поверхности загрузки, что сопровождается высокой эффективностью удаления железа (снижение железа в фильтрате до его следов). Избыточная биомасса удаляется при промывке фильтров.

В сущности, биотехнология обработки воды представляет собой два противоположных процесса: биологическое окисление и механическое фильтрование. Если процессы происходят в одном сооружении (скором фильтре), то это не может быть решено оптимальным способом без ущерба одному из них. Поэтому в последнее время при проектировании и строительстве новых станций (установок) обезжелезивания воды рекомендуются двухступенчатые схемы удаления этих соединений [3], т.е. отдельные процессы биоокисления и фильтрования.

Предполагается обработку воды сначала проводить в аэрационной колонне – биореакторе, часть которой заполнена элементами со значительной активной поверхностью для роста биомассы, а затем направлять воду на фильтрование. В биореакторе предусматривают усиленную аэрацию-дегазацию исходной воды с проведением окисления железа в биореакторе. Последующее фильтрование производят на фильтрах с плавающей загрузкой. Такая схема обеспечивает наиболее устойчивую и эффективную работу станции в широком диапазоне состава обрабатываемой воды с включением биологических процессов окисления железа, марганца и эффективного удаления растворенных газов (диоксида углерода, сероводорода и др.).

В условиях работы обычных открытых фильтров с прямоугольным (квадратным) в плане железобетонным корпусом, особенно действующих (например, водозаборы № 1–4 г. Витебска), двухступенчатую обработку воды осуществить практически невозможно. В данном случае, очевидно, возникает необходимость рассмотреть вопрос о реконструкции приемных камер с применением эффективных аэрационных устройств вместо обычного выпуска исходной воды из трубопровода в приемную камеру.

На всех водоочистных сооружениях для восстановления фильтрующей способности скорых фильтров производится их промывка водой из резервуаров чистой воды при ее подаче обратным током, возможно, совместно с воздухом. Типовая (проектная) система отвода и обработки промывной воды принята замкнутой без режима «продувки», исключая ее сброс за пределы территории станции обезжелезивания. По [4; 5] промывная вода после фильтров по самотечному трубопроводу поступает в отстойники периодического действия. Осветленная вода из отстойников насосом перекачивается в приемную камеру станции обезжелезивания, но не более 4% от общего расхода воды, подаваемого на скорые фильтры, а уплотненный осадок этим же насосом 1 раз в одну-две недели направляют на шламовые площадки. Допускается с учетом требований местных контролирурующих органов сбрасывать осветленную воду в водоток или водоем, или канализационную сеть.

Однако опыт эксплуатации фильтров на различных станциях обезжелезивания воды с возвратом осветленной промывной воды показал неэффективную работу скорых фильтров из-за нарушения процесса окисления и удаления железа методом упрощенной аэрации, так как мелкодисперсная взвесь оксида трехвалентного железа не задерживается загрузкой фильтра, что приводит к ухудшению качества фильтрата.

Объекты обследования. Водоснабжение города Витебска осуществляется артезианской водой из централизованной системы водоснабжения, объединяющей четыре водозабора, состоящих из скважин и станций водоподготовки (обезжелезивания воды), основная задача которых – обеспечение водой нормативного качества населения, предприятий, организаций и учреждений. В среднем по всем

водозаборах концентрация общего железа составляет порядка 3 мг/л с содержанием двухвалентного железа 2,3 мг/дм³ (75%), что при всех дополнительных условиях [1; 4; 5] указывает на возможность применения метода упрощенной аэрации. В настоящее время все водозаборы не работают на полную проектную производительность. Для удаления железа скорые фильтры работают с преобладанием биологических процессов. На станциях обезжелезивания принята подача воды из скважин – вначале в приемную камеру, затем на скорые фильтры с железобетонным корпусом и центральным каналом. Загрузка фильтров разнообразная: кварцевый песок, щебень, керамзит.

Промывка скорых фильтров производится обратным током воды. Промывные воды направляются в отстойные сооружения и далее на две-три шламовые площадки с дренирующим дном, которые запроектированы с учетом испарения воды при их заполнении в осенне-летний (197 суток) и намораживания в остальной период с отрицательной температурой (ниже минус 1,3 °С). Наполнение площадок производится поочередно. По мере накопления осадок вывозится в отвал.

На водозаборе № 2 осветленная вода после шламовых площадок поступает в сборный колодец и перекачивается в коллектор уличной сети хозяйственно-бытового назначения. При наличии такой возможности – это наиболее простой и надежный способ обработки промывной воды совместно со сточными водами на общеплощадочных городских очистных сооружениях.

На водозаборах № 1, 3 и 4 такой вариант отсутствует, поэтому осветленная вода со шламовых площадок собирается в сборных колодцах и самотеком отводится в ливневую систему за пределы производственной территории станций обезжелезивания в бассейн реки Западная Двина. На этих станциях существует проблема высокой концентрации железа в осветленной воде и частично взвешенных веществ, превышающих нормативные значения, что обусловлено, прежде всего, тем, что рабочая площадь шламовых площадок рассчитана на поступление только железа и его соединений. Дополнительный объем взвешенных веществ, образованных в процессе биотехнологии, с последующим фильтрованием вследствие изменения солевого состава водной среды (например, наличие гидроксида магния и карбоната кальция и т.д.), а также выноса и роста биомассы и, возможно, других органических веществ при промывке скорых фильтров, не учитывался.

Для оптимизации использования шламовых площадок с получением нормативной концентрации железа при выпуске осветленной воды в открытый водоем необходимо определить состав промывных вод скорых фильтров с песчаной загрузкой, что и явилось целью данной работы. В качестве основного объекта изучения принят водозабор № 3, использующий 60...75% проектной мощности.

При определении состава промывных вод выбраны наиболее характерные по получению нормативного качества фильтрата (следы железа) по параметрам фильтрования и промывке – скорые фильтры № 1 и 2. Фильтрующая загрузка представляет собой кварцевый песок фракции 1...2 мм, высота – 1,0 м. Пробы отбирались непосредственно в фильтре при условии перелива промывной воды на уровне желобов от начала и до конца его промывки. Далее в них определялись общие концентрации взвешенных веществ $C_{взв}$ и общее железо $Fe_{общ}$. Так как преобладающей формой железа в осветленной воде является гидроксид железа $Fe(OH)_3$, условно вся его концентрация была переведена в это соединение с коэффициентом, равным 1,91. Состав промывных вод в процессе промывки скорых фильтров представлен в виде графиков на рисунках 1–2 и в таблице 1.

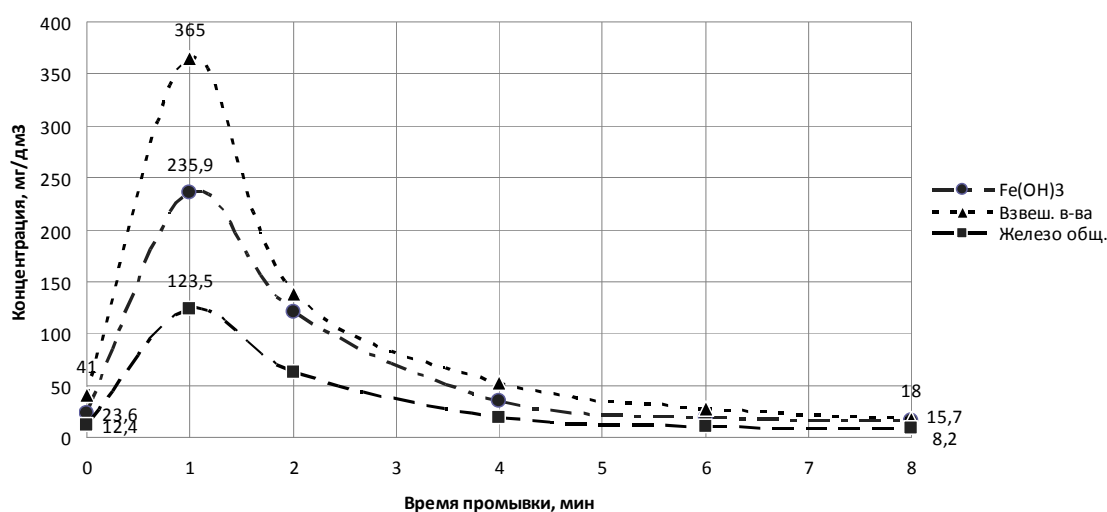


Рисунок 1. – Содержание железа и взвешенных веществ в промывной воде фильтра № 1 водозабора № 3

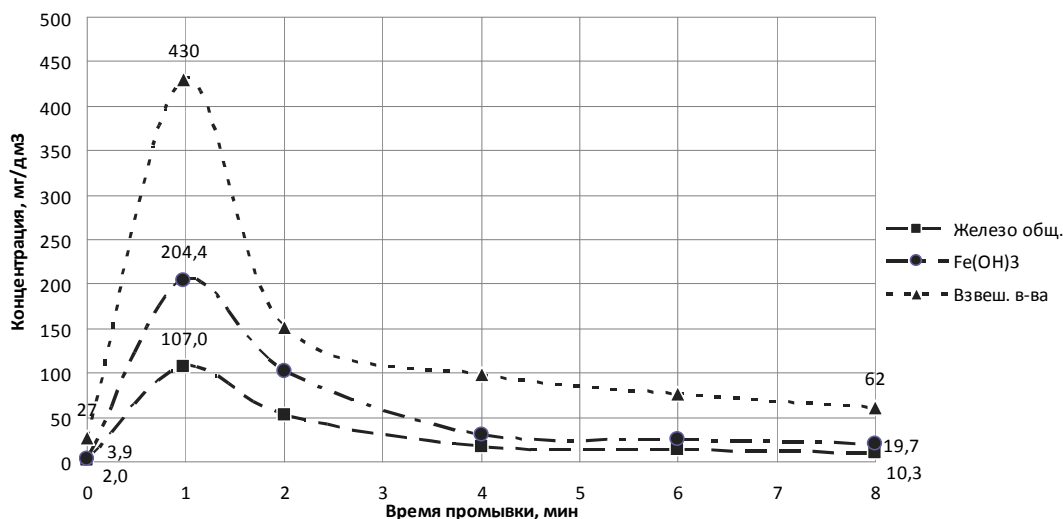


Рисунок 2. – Содержание железа и взвешенных веществ в промывной воде фильтра № 2 водозабора № 3

Таблица 1. – Результаты определения состава промывных вод скорых фильтров

Номер скорого фильтра	Тип загрузки	F_{ϕ} , м ²	$W_{\text{пр}}$, м ³	Опытные значения массовых количеств концентраций значений			Средние значения концентраций загрязнений		
				$C_{\text{взв}}$, кг	$Fe_{\text{общ}}$, кг	$Fe(OH)_3$, кг	$C_{\text{взв}}$, мг/дм ³	$Fe_{\text{общ}}$, мг/дм ³	$Fe(OH)_3$, мг/дм ³
<i>Водозабор № 3</i>									
Фильтр № 1	Песок	25	170	26,0	9,7	18,6	150	60	115
Фильтр № 2	Песок	25	170	36,5	8,7	16,6	215	60	115

Анализ кривых показывает, что их характер для разных фильтров с песчаной загрузкой практически одинаков и подчиняется эквипотенциальному закону распределения частиц типа $C = e^{-kt}$, где C – концентрация взвеси, e – основание натурального логарифма, k – коэффициент скорости изменения концентраций, t – время промывки. Основное количество загрязнений удаляется за первые 2 мин. Рациональное время промывки можно принять порядка 5 мин. Однако полученные данные по массе выносимых при промывке загрязнений указывают на неравномерность скорости протекания биологических процессов в работе каждого фильтра при прочих одинаковых условиях, например, количестве профильтрованной воды и начальной концентрации общего железа. Практически при равном количестве задержанного железа (отклонение ~10%) общее количество взвешенных веществ в фильтре № 2 значительно выше и составляет ~30%. В результате отличается и соотношение *взвешенные вещества : гидроксид железа* в рассматриваемых фильтрах, о чем свидетельствуют данные таблицы 1 и рисунка 3.

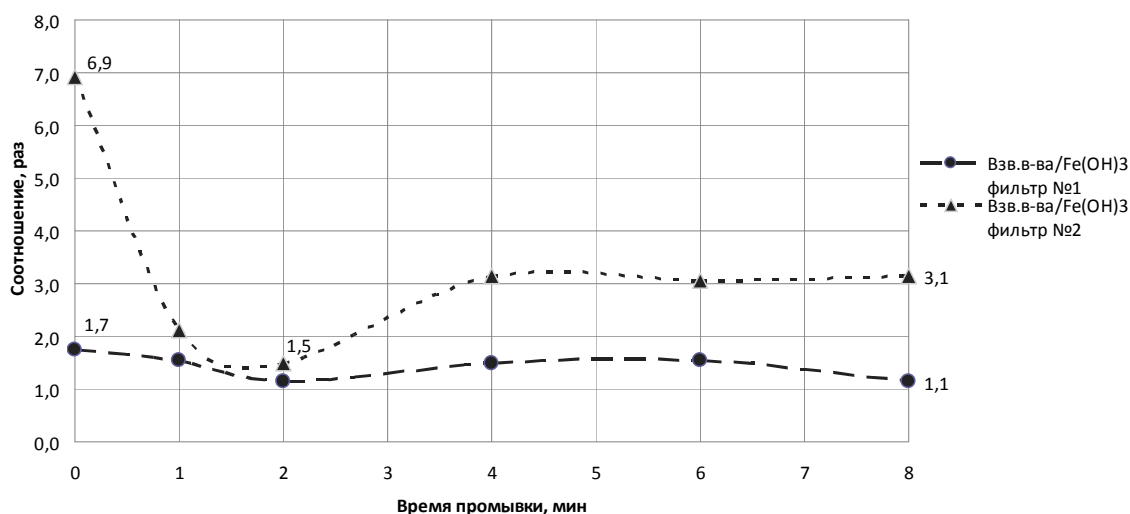


Рисунок 3. – Соотношение взвешенные вещества : гидроксид железа в фильтрах № 1–2 водозабора № 3

Среднее значение соотношения взвешенные вещества : гидроксид железа для фильтра № 1 составило 1,4; для второго фильтра – 2,2. То есть состав промывных вод в отдельных скорых фильтрах различается между собой в зависимости от степени биологических процессов, протекающих в них при биологическом обезжелезивании воды. В среднем соотношение взвешенные вещества : гидроксид железа : общее железо для расчета шламовых площадок при проектировании и реконструкции можно принять равным 4 : 2 : 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николадзе, Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г.И. Николадзе. – М. : Стройиздат, 1978. – 160 с.
2. Самуйло, В.Э. Обезжелезивание подземных вод в малых автономных системах водоснабжения : дис. магистр. техн. наук / В.Э. Самуйло ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2012.
3. Очистка сложных многокомпонентных вод биохимическими методами / Седлухо Ю.П. [и др.] // Вода Magazine – 2014. – № 6(82).
4. Сооружения водоподготовки. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.01-31-2009. – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2009.
5. Сооружения водоподготовки. Обезжелезивание подземных вод. Правила проектирования: ТКП 45-4.01-201-2010 (02250). – Минск. НПП РУП «Стройтехнорм», 2010.
6. Водоподготовка и водоочистка [Электронный ресурс] / Полимерконструкция. – Режим доступа: http://polymercon.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=37&Itemid=67. – Дата доступа: 16.04.2017.
7. Журба, М.Г. Биохимическое обезжелезивание и деманганация подземных вод / М.Г. Журба, А.Н. Квартенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 9, ч. 2. – С. 17–23.
8. Седлуха, С.П. Биологический метод очистки подземных вод от железа / С.П. Седлуха, О.С. Софинская // Вода и экология: проблемы и решения. – 2001. – № 1 – С. 13–21.
9. Degremont : Технический справочник по обработке воды : пер. с фр. Т. 2. – СПб. : Новый журнал, 2007.

Поступила 02.07.2017

DETERMINATION OF THE COMPOSITION OF WASH WATER FROM RAPID FILTERS IN BIOLOGICAL TREATMENT OF UNDERGROUND WATER SOURCES FROM IRON

**V. YUSHCHENKO, E. LESOVICH,
U. SAMUILA, E. SHADURA**

Features of application of biological method of deferrization of water in open fast filters with sand loading, schemes of treatment of washing waters are considered. The results of researches, on an estimation of structure of washing water are given. The analysis of the results is performed.

Keywords: water supply, water iron removal, open fast filters, sand loading, rinse water, composition.

УДК 631.158:658.345

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Ал. Л. МИСУН

(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Предложен методический подход для оценки производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур, отличающийся от существующих тем, что позволяет на стадии разработки технического средства прогнозировать возможный риск травмирования оператора мобильной сельскохозяйственной техники с учетом показателя ее приспособленности к выполнению технологического процесса и изменяющихся параметров состояния производственной среды.

Ключевые слова: травматизм, возделывание сельскохозяйственных культур, производственный риск, оценка, методический подход.

Введение. Улучшение условий и охраны труда, сохранение жизни и здоровья работающих – один из приоритетных направлений социально-экономической политики в Республике Беларусь. Полное исключение из процесса труда формирования неблагоприятных для здоровья факторов не всегда возможно даже в тех производствах, где внедрены передовая технология, современное оборудование, высокая культура производства и качественное медицинское обслуживание. Это касается и агропроизводства, которое к тому же сопряжено и с целым рядом природно-климатических факторов. Несмотря на использование современных технологий производства сельскохозяйственной продукции, уровень травматизма на предприятиях агропромышленного комплекса (АПК) остается высоким, а одной из наиболее травмоопасных отраслей считается растениеводство (плюс переработка сельскохозяйственной продукции), где происходит около 30% от всех несчастных случаев в АПК с тяжелым исходом. Даже строгое соблюдение требований безопасности при возделывании сельскохозяйственных культур не гарантирует возникновения рисковенных для здоровья работающих ситуаций. Решение этой проблемы послужило основанием выбора направления исследования – совершенствование научно-методического обеспечения оценки производственного риска как на стадии разработки технических средств, так и при дальнейшем их использовании, с учетом изменяющихся параметров состояния производственной среды.

Основная часть. При обосновании методического подхода для оценки производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур учитывалось, что подавляющее число случаев производственного травматизма операторов связано с выполнением работ по технологической настройке и устранению отказов сельскохозяйственной техники. Сложившаяся ситуация во многом объясняется недостаточной приспособленностью техники – удобства, доступности и безопасности выполнения этих работ в условиях как постоянного присутствия на рабочем месте операторов опасных производственных факторов (подвижных частей оборудования, острых кромок и заусениц на поверхностях технического средства, проведением регулировочных работ на значительной высоте относительно поверхности земли и др.), так и изменяющихся параметров состояния производственной среды, когда оператору приходится многократно (десятки раз за смену) выполнять регулировку технического средства или устранение отказа, что в дальнейшем сказывается на утомляемости и приводит к повышению риска травмирования работника.

Для решения поставленной задачи на начальном этапе предусматривается подбор экспертов. Кандидаты в эксперты оцениваются по обобщенному показателю с учетом их технического интеллекта, ответственности и надежности в работе, а также эмоциональной устойчивости. Уравнение регрессии для оценки профессионально значимых качеств у предполагаемых экспертов имеет следующий вид [1]:

$$Y = -1,77 + 2,86X_1^u + 1,61X_2^u + 2,28X_3^u,$$

где Y – оценка профессионально значимых качеств у предполагаемых экспертов; $X_{1...3}^{u(n; \varepsilon)}$ – нормализованные оценки результатов тестирования.

При проведении экспертной оценки удобства, доступности и безопасности выполнения технологических регулировок и устранения отказов мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) все регулировки делятся, в частности, на оперативные и установочные. К оперативным относятся технологические регулировки, выполнение которых не требует прерывания работы технического средства, либо регулировки, выполняющиеся неоднократно в течение рабочей смены с прерыванием технологического

процесса (остановкой машины, выключением рабочих органов и т.д.). Установочными считаются регулировки, выполнение которых производится не чаще одного раза в рабочую смену и требует прерывания технологического процесса [2].

Для сравнения удобства, доступности и безопасности выполнения технологических регулировок и устранения отказов МСХТ рекомендуется оценочная шкала от одного до пяти баллов; пять баллов означает высокую приспособленность технического средства к проведению этих работ, а одним баллом оценивается крайне низкая приспособленность регулировки рабочего органа для безопасного и эффективного их выполнения.

Для оценки удобства проведения регулировки учитывается положение тела и рук оператора МСХТ в ходе ее выполнения. Так, регулировка, при выполнении которой оператор МСХТ сидит, держа руки перед собой на уровне груди, оценивается в пять баллов. Этот вариант встречается при регулировании режимов работы рабочего органа средств механизации из кабины МСХТ. При работе оператора МСХТ с объектом регулирования сидя, с поворотом или наклоном туловища до 90 градусов, регулировка оценивается в четыре балла. В два балла оценивается регулировка, выполняемая с использованием дополнительных опор, подставок и др.

Для определения степени доступности проведения технологических операций для поддержания работоспособности МСХТ учитывается наличие пространства для их выполнения. Если не требуется, чтобы оператор покинул кабину МСХТ, то, например, регулировка оценивается в пять баллов. В случае если для поступления доступа к ней оператору МСХТ необходимо откинуть щиток, крышку и др., степень доступности выполняемой работы принимается равной четырем баллам. Регулировка вблизи цепных или ременных передач оценивается в три балла. Самую низшую оценку имеет регулировка, требующая разборки узла рабочего органа технического средства.

Оценка безопасности выполняемых оператором работ по поддержанию работоспособности техники проводится исходя из местоположения оператора МСХТ, мер и действий, необходимых для обеспечения этого требования. Так, например, регулировка, производящаяся из кабины МСХТ, когда не требуется ее остановка и выключение рабочего органа технического средства, то есть исключена вероятность нахождения оператора МСХТ в потенциально опасных зонах, имеет оценку пять баллов. Безопасность же регулировки, выполняемой вне кабины МСХТ и требующей остановки технического средства, выключения рабочего органа, когда оператор МСХТ полностью находится в зоне режущих или колющих деталей машины, оценивается в три балла. Оценка в два балла выставляется при технологической регулировке, при выполнении которой необходимо находиться в зоне возможного произвольного опускания рабочих органов технического средства или отсутствия защитного устройства карданной передачи.

В результате проведенных исследований получено следующее выражение [3] для определения показателя приспособленности выполнения технологической регулировки (устранения отказа) технического средства:

$$K_{П_{ik}} = \frac{15,3 \cdot S_{ik}^l - 17,4 \cdot S_{ik} - S_{ik}^m}{176 \cdot t}, \quad (2)$$

где $K_{П_{ik}}$ – показатель приспособленности k -того технического средства к i -той технологической регулировке; a, b, c – коэффициенты удобства, доступности и безопасности регулировочных работ; S_{ik} – сумма баллов экспертной оценки показателей удобства, доступности и безопасности i -той регулировки k -того технического средства; S_{ik}^l и S_{ik}^m – соответственно сумма квадратов и кубов баллов, выставленных экспертами за удобство, доступность и безопасность проведения i -той регулировки k -того технического средства; t – число показателей приспособленности i -той регулировки k -того технического средства.

Обобщенный показатель приспособленности k -того технического средства к технологическим регулировкам ($K_{П_{r,c}}$) рассчитывается как среднее геометрическое значений $K_{П_{i,k}}$.

Безопасность выполнения отдельно взятой i -той технологической регулировки (устранения отказов) технического средства ($K_{Б_{p_i}}$) определяется по следующей формуле [4]:

$$K_{Б_{p_i}} = 1,5 \cdot K_{П_i} - 0,5 \cdot K_{П_i}^2. \quad (3)$$

Производственный риск при выполнении i -той технологической регулировки k -того технического средства (P_{R_k}) (устранения отказа) определяется как

$$P_{R_k} = [1 - (1,5 \cdot K_{П_{ik}} - 0,5 \cdot K_{П_{ik}}^2)] p_{ik} \cdot K_{n,c}. \quad (4)$$

В формуле (4) p_{ik} – статистическая вероятность выполнения за смену i -той регулировки k -того технического средства; $K_{n.c}$ – коэффициент, учитывающий влияние изменения параметра состояния производственной среды на показатель травмирования оператора МСХТ при выполнении i -той регулировки k -того технического средства.

Для определения прогнозного обобщенного показателя производственного риска травмирования оператора МСХТ с учетом ее приспособленности к выполнению технического процесса в условиях изменяющихся параметров состояния производственной среды используется формула для расчета средней геометрической значений $P_{R_{ik}}$:

$$P_{R_{i.c.jk}} = \sqrt[n]{P_{R_{ik}} \cdot P_{R_{2k}} \cdot \dots \cdot P_{R_{nk}}}, \quad (5)$$

где $P_{R_{1k}}, P_{R_{2k}}, \dots, P_{R_{nk}}$ – производственный риск при выполнении i -той регулировки (устранения отказа) ($i = 1, 2, \dots, n$) k -того технического средства в условиях изменяющихся параметров состояния производственной среды.

Полученные аналитические зависимости (2)...(5) позволили с учетом данных травматизма в растениеводческой отрасли АПК [5] обосновать количественные показатели уровней опасности производственного риска (таблица 1) и разработать для их определения соответствующее программное обеспечение.

Таблица 1. – Уровни опасности производственного риска при выполнении технологических процессов в растениеводческой отрасли АПК [3]

Наименование уровня опасности производственного риска	Уровень опасности производственного риска, %
Минимальный	До 14,0
Предельный	14,0...29,0
Значительный	30,0...46,9
Угрожающий	47,0...63,9
Катастрофический	64,0 и более

Для управления производственным риском в технологических процессах растениеводческой отрасли АПК – выработке корректирующих действий по устранению неприемлемого уровня риска как на стадии разработки, так и при дальнейшем использовании технического средства необходимо:

- проанализировать полученные значения показателя приспособленности технического средства к технологическим регулировкам ($K_{П.с.}$) и безопасности их выполнения ($K_{Бп}$);

- определить прогнозируемый показатель безопасности управления технологическим процессом ($K_{Бпр.}$);

- рассмотреть с учетом полученных значений показателей ($K_{П.с.}; K_{Бп}; K_{Бпр.}$) соответствие технического состояния технического средства производственным условиям выполнения работ. В случае несоответствия:

- определить показатель приспособленности конструкции технического средства к безопасному выполнению технологических регулировок;

- обосновать безопасные режимы использования технического средства.

Выработку корректирующих действий по устранению неприемлемого уровня производственного риска рекомендуется осуществлять посредством моделирования технологического процесса, с учетом уточненного показателя приспособленности технического средства к безопасному выполнению технологических регулировок (рисунок 1), интенсивности их выполнения и изменения состояния производственной среды (таблица 2).

Установлено, что даже при «хорошей приспособленности» технического средства к технологическим регулировкам ($K_{П.с.} = 0,8$), но двукратном (с 15 до 30 раз) увеличении изменения состояния параметра производственной среды, показатель травмирования оператора МСХТ возрастает в 1,15 раза.

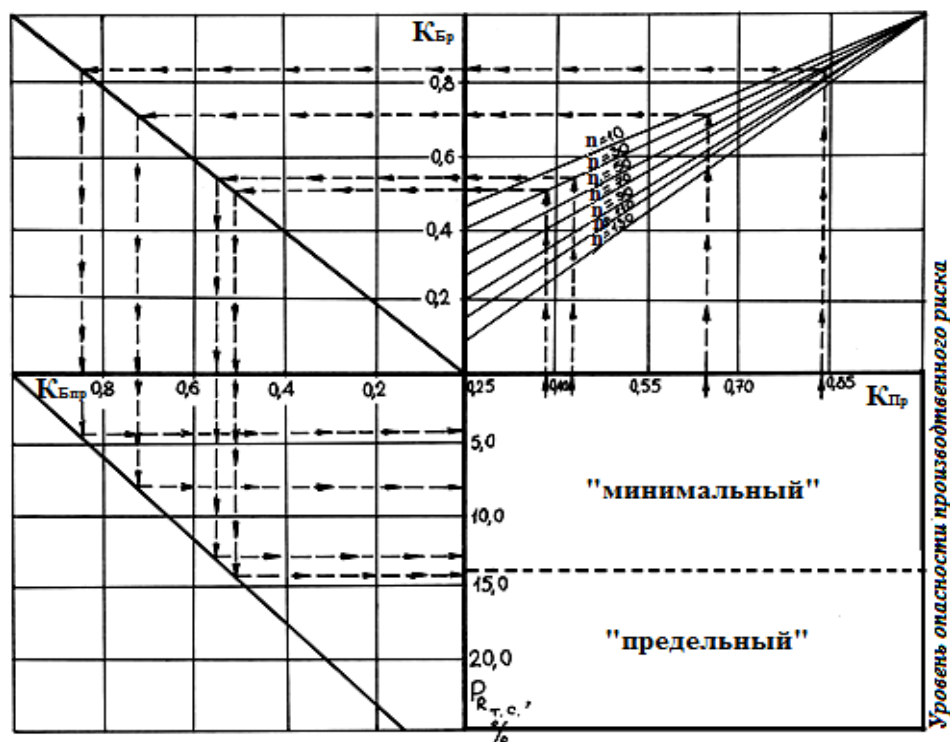


Рисунок 1. – Номограмма для определения уровня опасности производственного риска с учетом интенсивности выполнения технологических регулировок [6]

Таблица 2. – Показатель травмирования оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок с учетом изменения состояния параметра производственной среды [6]

Наименование показателя	Количество изменений за смену параметра состояния производственной среды, раз					
	5	10	15	20	25	30
Показатель травмирования ($P_{R.с.}$) оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок, %:						
при $K_{П.с.} = 0,4$	12,10	12,60	13,10	13,60	14,20*	14,80*
$K_{П.с.} = 0,6$	8,45	8,60	8,80	9,00	9,30	9,60
$K_{П.с.} = 0,8$	3,34	3,38	3,48	3,63	3,80	4,00

Для апробирования разработанного методического подхода для оценки производственного риска выбраны различные по своему функциональному назначению технические средства (для скашивания и измельчения растительности, внесения гербицидов, опрыскивания растений, уборки урожая), используемые для выполнения технологических процессов в растениеводческой отрасли АПК, в том числе и в промышленной технологии выращивания клюквы. Следует особо отметить, что рассматриваемые технические средства имеют повышенный уровень производственного риска, так как при их использовании объективно присутствуют опасные и вредные производственные факторы [7] и эксплуатируются они в условиях изменяющихся параметров состояния производственной среды (рельефа поверхности, состояния посевов, урожайности и др.).

С учетом полученных расчетных значений показателя приспособленности технических средств к безопасному выполнению работ определены уровни опасности производственного риска. Установлено, что «предельный» уровень опасности прогнозируется при выполнении технологического процесса ухода за клюквенным покровом промышленных чеков (таблица 3).

Таблица 3. – Уровни опасности производственного риска при выполнении технологических процессов на промышленных клюквенных чеках

Технологический процесс	Показатель приспособленности технического средства к технологическим регулировкам на чеке ($K_{\text{Трс}}$)	Показатель риска травмирования оператора технического средства при выполнении регулировок ($P_{\text{Рт.с.}}$), %	Уровень опасности производственного риска
Механизированный уход за промышленными клюквенными чеками	0,37	14,5	Предельный
Опрыскивание растений	0,50	12,3	Минимальный
Контактное нанесение раствора гербицида на сорную растительность	0,59	7,4	Минимальный
Срезание и измельчение сорной растительности	0,63	3,8	Минимальный
Уборка урожая	0,64	3,5	Минимальный

Для выработки корректирующих действий по устранению неприемлемого уровня производственного риска для рассматриваемого примера *смоделирован технологический процесс* с целью обоснования более приспособленной к технологическим регулировкам конструкции рабочих органов технического средства для механизированного ухода за клюквенником. Для этого *реализованы следующие мероприятия*:

- выполнены патентные исследования;
- предложена конструкция технического средства;
- проведены экспериментальные исследования, что позволило более чем в два раза (таблица 4) увеличить приспособленность технического средства к технологическим регулировкам и устранению отказов, уменьшить на 11,5% риск травмирования оператора, снизить до «минимального» уровень опасности производственного риска.

Таблица 4. – Уровень опасности производственного риска при выполнении технологического процесса механизированного ухода за чеками

Технологический процесс	Показатель приспособленности технического средства к технологическим регулировкам ($K_{\text{Трс}}$)	Показатель риска травмирования оператора технического средства при выполнении регулировок ($P_{\text{Рт.с.}}$), %	Уровень опасности производственного риска
Механизированный уход за чеками	0,37*/0,81**	14,5*/3,0**	Предельный*/ Минимальный**
* – значение показателя для технического средства с прутковым поднимающе-расчесывающим рабочим органом; ** – для рабочего органа в виде сдвоенных пружинных зубьев.			

Заключение. В результате проведенных исследований *предложен методический подход* для оценки производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур, что позволяет как на стадии разработки технического средства, так и при дальнейшем его использовании прогнозировать риск травмирования оператора мобильной сельскохозяйственной техники с учетом показателя ее приспособленности к выполнению технологических процессов и изменяющихся параметров состояния производственной среды. На примере механизированного ухода за клюквенным покровом промышленных чеков *рассмотрены корректирующие действия* для устранения неприемлемого уровня производственного риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаренко, В.В. Научно-методическое обеспечение исследований безопасности управления технологическими операциями на клюквенном чеке / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.Ю. Ларичев // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомств. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2015. – Вып. 49. – С. 262–273.

2. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Методы оценки приспособленности к техническому обслуживанию : ГОСТ 26026-83. – М., 1985. – 10 с.
3. Мисун, А.Л. Управление уровнем профессиональных рисков в промышленном выращивании клюквы / А.Л. Мисун // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомств. темат. сб. / РУП НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 128–134.
4. Результаты теоретических исследований и моделирования условий безопасного функционирования человеко-машинных систем / Ю.Д. Олянич [и др.] // Охрана труда и здоровья работников АПК России : сб. тр. ВНИИОТ. – Орел : ВНИИОТ, 1993. – С. 32–40.
5. Пиуновский, И.И. Травматизм работников сельхозпредприятий при производстве продукции растениеводства / И.И. Пиуновский, А.В. Молош // Охрана труда. Сельское хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 91–97.
6. Азаренко, В.В. Методические подходы оценки и управления производственным риском в растениеводческой отрасли АПК Беларуси / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.Л. Мисун // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 3. – С. 99–108.
7. Азаренко, В.В. О результатах исследований повышения безопасности и эффективности использования технических средств на клюквенных чеках / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.Ю. Ларичев // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. на 25-й Междунар. специализированной выставке «Белагро-2015», Минск, 4 июня 2015 г. / М-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: Н.А. Лабушев [и др.]. – Минск : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2015. – С. 63–67.

Поступила 03.08.2017

ASSESSMENT OF PRODUCTION RISK IN THE CULTIVATION OF CROPS

A. MISUN

The methodical approach for assessment of production risk in the cultivation of crops that differ from the existing ones, allowing for stages of development of technical means to predict the possible risk of injury to mobile farm equipment weighted by its suitability for the implementation of the process and changing parameters of a condition of the production environment.

Keywords: *injuries, the cultivation of crops, production risk, methodological approach, evaluation.*

УДК [631.158:658:345]:[631.55:633.2/3]

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА НА УБОРКЕ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР*Ал-р Л. МИСУН**(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

Рассмотрено влияние уровня профессиональной подготовки оператора мобильной сельскохозяйственной техники на безопасность труда. Предложены организационные мероприятия по повышению производственной безопасности на уборке кормовых культур.

Ключевые слова: *безопасность труда, оператор мобильной сельскохозяйственной техники, профессиональная подготовка, условия труда.*

Прогнозирование условий и безопасности труда в технологических процессах выступает как важнейшее направление в профилактике травматизма. В свою очередь, каждый из методов анализа и прогнозирования производственного травматизма (статистический, монографический, эргономический, экономический и др.) имеет свои специфические особенности и базовую информацию. Недостовверная оценка условий труда работающих исключает возможность принятия соответствующих мер, несет в себе потенциальную опасность, не позволяет рационально планировать материальные вложения в мероприятия по обеспечению производственной безопасности.

Основная часть. Анализ безопасности функционирования системы «человек – машина» на заготовке кормов позволяет выделить и акцентировать внимание на трех основных функциях человека: обработка информации; принятие решений; управление (действие). Данные функции, выполняемые оператором кормоуборочного комбайна, являются универсальными.

Отрицательное последствие информационных перегрузок оператора выражается в резком ухудшении качества выполняемых работ. Следует также отметить, что важнейшим фактором снижения воздействия информационных нагрузок на оператора мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) является состояние производственной среды (кабины МСХТ), характеризующееся ее травмобезопасностью. Оценка травмобезопасности, осуществляемая в ходе аттестации рабочих мест по условиям труда, совместно с гигиеническим мониторингом позволяет наиболее полно проанализировать безопасность производственной среды. В то же время отмечается и ряд недостатков в целях и процедуре оценки травмобезопасности [1–7]:

- в процессе оценки анализируется наличие и соответствие нормативным требованиям средств обеспечения безопасности. Отсутствует оценка эффективности средств обеспечения безопасности и риска травмирования;

- проводимая оценка является качественной (формальной), что затрудняет в последующем ранжирование результатов оценки. Количественная оценка крайне важна, так как по статистике достаточно большое количество инцидентов и несчастных случаев происходит на рабочих местах, оцененных первым классом (оптимальные условия труда) по травмобезопасности [2]. Такая качественная характеристика не позволяет выявить тенденции при анализе;

- при оценке травмобезопасности рабочего места зачастую не оцениваются (не могут быть оценены) травмирующие факторы, природа и условия, возникновение которых не связаны с оборудованием анализируемого рабочего места;

- изолированная гигиеническая оценка и оценка травмобезопасности не позволяют выявить физические, химические и психофизиологические факторы, способные увеличить вероятность травмирования работника;

- методический подход, лежащий в основе оценки травмобезопасности рабочих мест, основан на концепции абсолютной безопасности, которая достигается, как предполагается, при первом классе по травмобезопасности [1]. Данный подход противоречит аксиоме безопасности жизнедеятельности о потенциальной опасности всякой человеческой деятельности и неизменном присутствии остаточного риска.

По нашему мнению, главный недостаток оценки травмобезопасности – отсутствие возможности количественно интерпретировать результаты оценки, что порождает ряд серьезных недостатков, описанных выше.

Существенным усовершенствованием методики оценки должен быть переход к концепции приемлемого риска и отказ от концепции абсолютной безопасности. Однако это требует качественно нового подхода количественной оценки уровня травмобезопасности. Целесообразно также учитывать не только оценку травмобезопасности производственной среды, но и оценить травмоопасность технического сред-

ства, что позволяет не формально фиксировать нарушения государственных нормативных требований охраны труда, а объективно выявлять опасности и оценивать производственный риск при функционировании системы «человек – машина» [1].

Наиболее приемлемым направлением исследований безопасности труда операторов МСХТ (рисунок 1), на наш взгляд, является определение количества возможных опасных ситуаций по вероятности отказов техники, вероятности нахождения работника в опасной производственной зоне. Положительные моменты такого подхода определяются четким отражением важнейшей составляющей при эксплуатации технических средств – их эксплуатационной надежности [8].

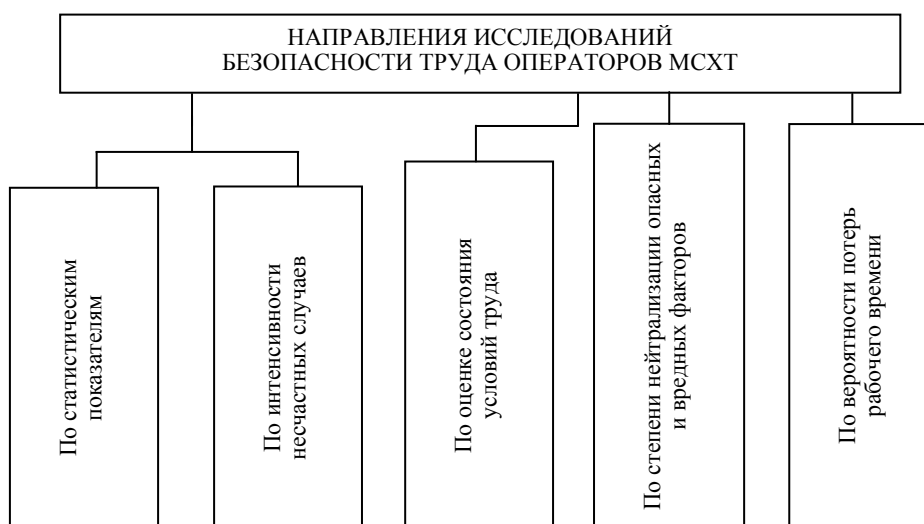


Рисунок 1. – Направления исследований оценки безопасности труда операторов мобильной сельскохозяйственной техники [9]

Результаты аналитических исследований [8; 10] показали, что наиболее существенными факторами, влияющими на безопасность труда операторов МСХТ, являются травмоопасность технического средства (ρ_{τ}), условия труда на рабочем месте ($K_{y,\tau}$), а также уровень профессиональной подготовки работника ($V_{п.п.}$). Учитывая, что безотказно работающих машин и механизмов практически не существует, при возникновении отказа в работе любой МСХТ необходимо немедленное вмешательство оператора МСХТ, выполнение им функций управления. Залогом же успешной его работы служит доскональное знание технологического процесса, требований производственной эксплуатации технического средства и техники безопасности, то есть все то, что характеризует профессиональную подготовку. Для определения уровня профессиональной подготовки оператора МСХТ получена следующая зависимость:

$$V_{п.п.} = 3,344 \cdot e^{-1,206 \cdot \tau} \cdot pV^{0,515}, \quad (1)$$

где P_v – уровень способностей оператора МСХТ выполнять управленческие воздействия на изменения в технологическом процессе; τ – затраты времени на выполнение управленческих воздействий (рассчитываются как отношение фактического времени на устранение воздействий (отказа техники) ко времени, установленному согласно нормативам).

Графическое отображение полученной зависимости (1) проиллюстрировано на рисунке 2.

Условно выделяются три уровня профессиональной подготовки оператора МСХТ (таблица 1):

- «высокий» – $V_{п.п.} = 1,0 \dots 0,7$;
- «средний» – $V_{п.п.} = 0,69 \dots 0,35$;
- «низкий» – $V_{п.п.} < 0,35$.

Результаты исследований показали, что «высокий» уровень безопасности труда на уборке кормовых культур наблюдается:

- при «высоком» уровне профессиональной подготовки оператора МСХТ, о чем свидетельствуют данные таблицы;
- при допустимых условиях труда (класс условий труда «2») и «низкой» травмоопасности технического средства ($\rho = 0,150 \dots 0,100$).

«Недопустимый» уровень безопасности труда возможен, когда при любых значениях показателя профессиональной подготовки оператора МСХТ ($U_{п.п.}$) имеет место четвертый класс условий труда ($K_{у.т.}$).

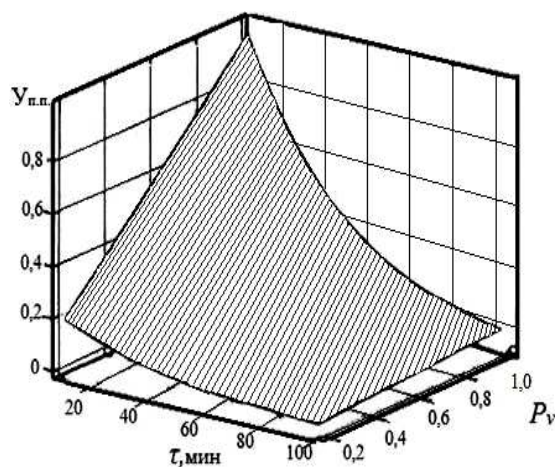


Рисунок 2. – Зависимость показателя профессиональной подготовки ($U_{п.п.}$) от затрат времени на выполнение управленческих воздействий (τ) и уровня способностей оператора МСХТ выполнять эти воздействия (P_v)

Таблица 1. – Уровни профессиональной подготовки операторов МСХТ

Уровни профессиональной подготовки	Интервал изменения уровня профессиональной подготовки ($U_{п.п.}$)	Оценка, балл
Высокий	0,70...1,0	4,25...5,0
Средний	0,35...0,69	3,40...4,24
Низкий	< 0,35	< 3,40

Последовательность проведения организационных мероприятий по повышению уровня безопасности труда операторов за счет их рационального распределения за кормоуборочными комбайнами представлена в таблице 2.

Таблица 2. – Организационные мероприятия по снижению уровня опасности производственного риска на уборке кормовых культур

Вид мероприятия	Примечания
1	2
1 Проведение аттестации рабочих мест по условиям труда с целью определения класса условий труда $K_{у.т.}$	В соответствии с действующим Порядком проведения аттестации рабочих мест по условиям труда
2 Определение баллов на основе установленного $K_{у.т.}$ [11]	$K_{у.т.}$ («высокий»): класс условий труда – «1»; «2» и «3.1», оценка в баллах – 3,70...5,0; $K_{у.т.}$ («средний»): класс условий труда – «3.2»; «3.3» и «3.4», оценка в баллах – 2,40...3,69; $K_{у.т.}$ («низкий»): класс условий труда – «4», оценка в баллах < 2,40
3 Определение уровня профессиональной подготовки оператора кормоуборочного комбайна ($U_{п.п.}$)	По формуле (1)
4. Определение баллов для $U_{п.п.}$	По таблице 1

Окончание таблицы 2

1	2
5 Определение показателя безопасности труда ($U_{б.т.}$) на основе балльной оценки $V_{п.п.}$, ρ_T и $K_{у.т.}$ [11]	$U_{б.т.}$ («высокий»): $4,25 \leq V_{п.п.} \leq 5,0$, $4,67 \leq \rho_T \leq 5,0$, $3,70 \leq K_{у.т.} \leq 5,0$; $U_{б.т.}$ («средний»): $3,40 \leq V_{п.п.} < 4,25$, $4,34 \leq \rho_T < 4,67$, $2,40 \leq K_{у.т.} < 3,70$; $U_{б.т.}$ («низкий»): $3,00 \leq V_{п.п.} < 3,40$, $3,00 \leq \rho_T < 4,34$, $2,00 \leq K_{у.т.} < 2,40$
6 Выделение комбайнов, при эксплуатации которых уровень безопасности труда – «недопустимый». Запрет их дальнейшей эксплуатации	Комбайны не эксплуатируются до устранения (частичного устранения) вредных и опасных производственных факторов
7 Выделение комбайнов, при эксплуатации которых уровень безопасности труда «низкий»	Возможно устранение вредных и опасных производственных факторов и (или) закрепление за комбайнами операторов с более высокой профессиональной подготовкой
8 Рациональное распределение операторов кормоуборочных комбайнов с целью обеспечения «высокого» или «среднего» уровней безопасности труда	Перерасчет различных вариантов распределения операторов кормоуборочных комбайнов согласно пункту 5

Такой подход использован для создания программного обеспечения, позволяющего просчитывать различные варианты распределения операторов кормоуборочной техники с целью определения наиболее эффективной и безопасной их работы. Совершенствование организации и условий труда операторов МСХТ может быть достигнуто и улучшением показателей трудового процесса (тяжести и напряженности труда), снижением вредного воздействия на организм человека физических (шум, вибрация и др.), химических (загазованность рабочей зоны) и биологических (вирусы, бактерии, риккетсии и т.д.) факторов (рисунок 3).



Рисунок 3. – Структура элементов условий труда, влияющих на повышение безопасности труда оператора кормоуборочного комбайна

Заключение. По результатам исследований обоснован подход к оценке профессиональной подготовки оператора мобильной сельскохозяйственной техники. Установлены варианты для организации безопасной эксплуатации технических средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорец, А.Г. Управление рисками: от оценки травмобезопасности к оценке травмоопасности / А.Г. Федорец // Безопасность в техносфере. – 2009. – № 2. – С. 25–30.
2. Пластинин, Б.Г. Количественная оценка травмобезопасности / Б.Г. Пластин, Л.Г. Шакирзянова, И.В. Зубанова // Охрана труда и социальное страхование. – 2007. – № 9. – С. 49–55.
3. Зубанова, И.В. Разработка методики количественной оценки травмобезопасности рабочих мест / И.В. Зубанова, Б.Г. Пластинин, Л.Г. Шакирзянова // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 8. – С. 6–8.
4. Суворов, С.Б. Комплексный подход к оценке травмобезопасности рабочих мест / С.Б. Суворов // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 8. – С. 2–4.
5. Суворов, С.Б. Об оценке вероятности травмирования работника на рабочем месте / С.Б. Суворов // Материалы междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 7–8 апр. 2009 г. – Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – Пермь, 2009. – С. 94–97.
6. Муравский, А.К. Оценка травмобезопасности рабочих мест для целей их аттестации по условиям труда как элемент оценки профессионального риска / А.К. Муравский // Материалы междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 13–14 нояб. 2007 г. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 126–130.
7. Федорец, А.Г. Оценка травмоопасности в целях управления производственными рисками на рабочем месте / А.Г. Федорец, К.А. Чернышев // Тез. докл. V Междунар. конгр., Москва, 2–3 дек. 2008 г. – М. : Изд-во ФРГУ «ВНИИ охраны и экономики труда» Минздравсоцразвития России, 2009. – С. 35–39.
8. Мисун, А.Л. Прогнозируемая травмоопасность при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов / А.Л. Мисун // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – С. 179–185.
9. Азаренко, В.В. Анализ методов оценки и направления повышения безопасности труда на уборке кормовых культур / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.П. Утенков // Актуальные вопросы инновационного развития агропромышленного комплекса : материалы междунар. науч.-практ. конф., Курск, 28–29 янв. 2016 г. Ч. 2 ; редкол. В.А. Семькин [и др.]. – Курск : Изд-во Курск. гос. с.-х. акад., 2016. – С. 265–269.
10. Азаренко, В.В. Методические подходы оценки и управление производственным риском в растениеводческой отрасли АПК Беларуси / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.Л. Мисун // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 3. – С. 99–108.
11. Азаренко, В.В. Оценка уровня безопасности труда на уборке кормовых культур как показателя снижения профессиональных рисков / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, С.Н. Корбут // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2016. – № 3. – С. 99–106.

Поступила 04.08.2017

SAFETY OF LABOR ON COTTON CROPS CLEANING

A. MISUN

The influence of the level of professional training of the operator of mobile agricultural machinery on labor safety is considered. Organizational measures to improve industrial safety in harvesting fodder crops are suggested.

Keywords: labor safety, operator of mobile agricultural machinery, vocational training, working conditions.

УДК 331.628

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ШУМА ПРИ ОБКАТКЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. В.Г. АНДРУШ; канд. техн. наук, доц. Т.П. КОТ; А.К. ЕВТУХ
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Рассматривается повышенный уровень шума как один из наиболее опасных и вредных производственных факторов для операторов обкаточно-испытательных станций. Проведенные исследования показали, что при стендовой обкатке автотракторных двигателей ЯМЗ-238, Д260 и Д243 в условиях мотороремонтного завода наибольший уровень шума создает двигатель ЯМЗ-238. Превышение приходится на средние и высокие частоты, что приводит к значительной усталости работника и, как следствие, к снижению его работоспособности и внимательности, повышая тем самым риск несчастного случая или развития профессионального заболевания.

Ключевые слова: автотракторные двигатели обкатка, вредные производственные факторы, шум, повышенный уровень, работоспособность, риск.

Введение. Обкатка и испытание двигателей внутреннего сгорания (ДВС) сопровождается комплексным воздействием опасных и вредных производственных факторов как на окружающую природную среду, так и на операторов испытательных станций. Функции оператора при испытании ДВС сводятся к управлению, контролю протекания приработки, выявлению и устранению характерных неисправностей, регулировке основных технико-экономических характеристик двигателя. Продолжительность постоянного присутствия оператора на участке обкатки и испытания двигателей зависит от используемого оборудования, существующих систем управления и контроля, качества ремонта, степени автоматизации обкатки и других факторов, неблагоприятно отражается на его безопасности и здоровье.

Проведенные рядом авторов исследования функционального состояния операторов, занятых на обкатке дизельных автотракторных двигателей, показали, что к концу смены у них на 25% увеличивается время скрытого периода двигательной реакции (на свет и звук), снижается сила (до 9,2%) и выносливость к статическому усилию (до 29%), увеличивается число ошибок [1].

Социологическое исследование по выявлению степени удовлетворенности условиями труда, выявлению наиболее опасных и вредных производственных факторов, влияющих на операторов испытательных станций, свидетельствуют о том, что из отдельных факторов условий труда, как наиболее неблагоприятных при проведении испытаний, более половины операторов (52,5%) указали на сильный шум, 35,6% на загазованность [1].

В результате исследований выделены основные опасные и вредные производственные факторы в рабочей зоне стенда, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Ранжирование опасных и вредных производственных факторов

Опасные и вредные производственные факторы		Ранжирование
1	Повышенный уровень шума	1,0
2	Загазованность воздуха в рабочей зоне	0,8
3	Попадание на кожу топливно-смазочных материалов	0,7
4	Повышенный уровень вибрации	0,6
5	Избытки тепловых излучений	0,5
6	Недостаточная освещенность	0,1
7	Пожаро- и взрывоопасность	0,09
8	Подвижные части оборудования	0,07
9	Опасность поражения электрическим током	0,05
10	Динамические физические перегрузки	–
11	Нервно-психические перегрузки	–

Основная часть. При обкатке двигателей внутреннего сгорания операторы подвергаются воздействию интенсивного шума, основными источниками которого в поршневых двигателях являются процесс сгорания топлива в цилиндрах, рабочие динамические процессы в механизмах и системах, процессы газообмена [2].

В процессе экспериментальных исследований шума и вибрации обкатываемого на испытательном стенде двигателя определялись: основные источники шумообразования на холостом ходу; влияние ре-

жимов и видов обкатки на измерение спектров шума и вибрации; звукоизолирующая эффективность ограждений [3].

Характеристиками источников постоянного шума в соответствии с ГОСТ 12.1.003-2010 являются:

1) уровень звуковой мощности, дБА:

$$L_{wA} = \bar{L}_A + 10 \lg \frac{S}{s_0}, \quad (1)$$

где \bar{L}_A – средний уровень звука на измерительной поверхности, дБА; S – площадь измерительной поверхности, м²; $s_0 = 1$ м²;

2) уровень звуковой мощности в октавных полосах частот, дБА:

$$L_w = \bar{L} + 10 \lg \frac{S}{s_0}, \quad (2)$$

где \bar{L} – средний уровень звукового давления в полосе частот, дБА;

3) средний уровень звукового давления в контрольных точках в дБА:

$$\bar{L}_A = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{Ai} - 10 \lg n}, \quad (3)$$

L_{Ai} – i -тый из усредняемых уровней звука, дБА; $i = 1, 2, 3, \dots$; n – число контрольных точек;

4) средний общий уровень звукового давления в контрольных точках находится по формуле (3);

5) средний уровень звукового давления в октавных полосах частот: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, в контрольных точках, дБ, находится по формуле, аналогичной (3).

Если разница между наибольшим и наименьшим уровнями не превышает 5 дБА, то среднее значение уровня равно среднему арифметическому значению всех уровней, вычисляемому по формуле

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i. \quad (4)$$

Для источников непостоянного шума устанавливаются следующие акустические характеристики (ГОСТ 12.1.003-2010):

- эквивалентный скорректированный уровень звуковой мощности, дБА:

$$\tilde{L}_{wA} = \tilde{L}_A + 10 \lg \frac{S}{s_0}, \quad (5)$$

где \tilde{L}_A – эквивалентный (по энергии) уровень звука, дБА, находится по формуле:

$$\tilde{L}_A = 10 \lg \frac{1}{t} \int_0^t \left[\frac{P_A(t)}{P_0} \right] dt = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{Ai} - \Delta L_{Ai})}, \quad (6)$$

где $P_A(t)$ – текущее значение среднего квадратического звукового давления с учетом коррекции «А» шумомера, Па; t – время воздействия шума, ч.

Средний эквивалентный уровень звука в контрольных точках \bar{L}_A , дБА, вычисляется по формуле, аналогичной (3).

Средний эквивалентный уровень звукового давления в контрольных точках \tilde{L}_A , дБ, вычисляется по формуле, аналогичной (6).

Для рабочих мест с постоянным шумом устанавливаются следующие шумовые характеристики:

1) уровни звукового давления, дБА, в октавных полосах частот:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (7)$$

где P – среднее квадратическое значение звукового давления, Па; P_0 – опорное значение звукового давления, равное 20 мкПа;

2) уровни звука, дБА:

$$L_A = 20 \lg \frac{P_A}{P_0}, \quad (8)$$

где P_A – среднее квадратическое значение звукового давления с учетом корректировки «А» шумомера, Па;

3) общий уровень звукового давления L_{lin} , дБА.

Характеристиками непостоянного шума на рабочих местах являются:

- эквивалентный уровень звука \tilde{L}_A , дБА;
- эквивалентный общий уровень звукового давления \tilde{L}_{lin} , дБА;
- максимальный уровень звука L_{Amax} , дБА;
- максимальный общий уровень звукового давления \tilde{L}_{linmax} .

Уровни звукового давления измеряются в восьми точках на измерительной поверхности (рисунок 1).

Площадь измерительной поверхности в виде прямоугольного параллелепипеда определяли по формуле:

$$S = 4(a \cdot h + b \cdot c + a \cdot c) \cdot \left(\frac{a + b + c}{a + b + c + 2d} \right), \quad (9)$$

где $a = 0,5 \cdot l_1 + d$; $b = 0,5 \cdot l_2 + cl$; $c = l_3 + d$.

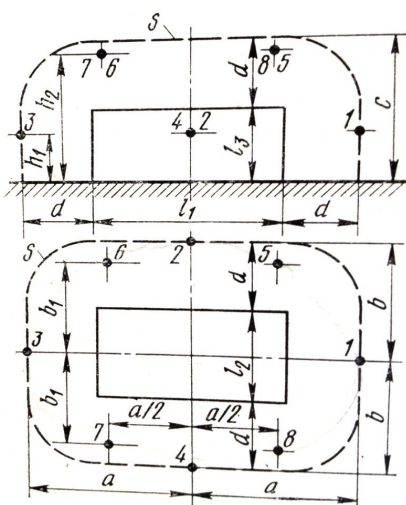
Здесь l_1, l_2, l_3 – соответственно длина, ширина и высота стенда обкатки, м; $d = 1$ м – измерительное расстояние.

Точки 1...4 расположены на высоте h_1 (которая не меньше 0,15 м), а точки 5...8 – на высоте h_2 (которая не превышает высоты над звукоотражающей плоскостью):

$$h_1 = 0,25(b + c - d); \quad (10)$$

$$h_2 = 0,75(b + c - d); \quad (11)$$

$$h_3 = 0,5(b + c - d). \quad (12)$$



S – площадь измерительной поверхности;

1–8 – точки измерений;

l_1, l_2, l_3 – основные габаритные размеры стенда с обкатываемым двигателем;

a, b, c – размеры измерительной поверхности;

h_1, h_2 – высота расположения точек

мер 1-го класса ОКТАВА-110А. Измерения проводились при температуре, магнитных и электрических полях, допускаемых изготовителями аппаратуры. До и после измерений на одной или нескольких частотах диапазона выполнялась акустическая калибровка шумомера.

Перед началом исследований проверялось соответствие условиям измерений. Размеры помещения были достаточны, чтобы разместить в центре обкаточно-испытательный стенд с двигателем и вокруг него на выбранной измерительной поверхности точки измерений.

При измерении шума микрофон устанавливался на высоте 0,5 м от уровня пола. В каждой точке проводилось 3 измерения по 30 секунд каждое.

Средний уровень звукового давления в октавных полосах частот на измерительной поверхности вычисляли по формуле:

$$\bar{L} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \right) - K, \quad (13)$$

где L_i – уровень звукового давления в полосе частот, дБА, в i -той точке измерения; K – постоянная, учитывающая влияние отраженного звука в полосе частот, дБА.

За результат измерения для оценки акустических характеристик и источников шума принимались значение уровней звука и звукового давления, полученные в контрольных точках.

С целью оценки уровня шума проводились исследования на участке испытания Слонимского мотороремонтного завода с боксовой системой расположения обкаточно-испытательных стендов.

Измерения проводились при обкатке двигателей ЯМЗ-238, Д260 и Д243.

Средний уровень звукового давления L'_p , дБА, в частотной полосе при работающем источнике шума рассчитывали по формуле:

$$L'_p = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L'_i} \right) - K, \quad (14)$$

где L'_p – уровень звукового давления, измеренный в i -той точке измерения, дБА; N – число точек.

Средний на измерительной поверхности уровень звукового давления в частотной полосе рассчитывался с учетом коррекции на фоновый шум и акустические условия окружающей среды, результаты значений округлялись до ближайшего значения, кратного 0,5 дБ.

Первоначально измерения проводились для двигателя Д-243 у пульта управления стендом, находящимся за пределами бокса, а затем внутри бокса около двигателя, результаты представлены на рисунке 2.



- 1 – уровень шума около двигателя;
2 – уровень шума у пульта управления;
3 – допустимый уровень шума

Рисунок 2. – Измеренные уровни шума для двигателя Д-243

Измеренные значения в среднеоктавных интервалах частот на режимах горячей обкатки под нагрузкой показали, что наибольшее превышение уровней шума приходится на средние и высокие частоты. Среднеоктавный уровень шума у пульта превышает на 8 дБ предельно допустимые значения, а при измерениях непосредственно в боксе около обкатываемого двигателя уровень шума превышает эти значения на 21 дБ. Так же проводили измерение уровня шума в боксе на режимах горячей обкатки под нагрузкой для двигателей ЯМЗ-238, Д-260 (рисунок 3).



- 1 – двигатель ЯМЗ-238; 2 – двигатель Д-260;
3 – допустимый уровень шума

Рисунок 3. – Уровни шума в боксе при обкатке автотракторных дизелей

Заключение. Наибольший уровень шума создает двигатель ЯМЗ-238, превышение приходится на средние и высокие частоты. Среднеоктавный уровень шума для двигателя ЯМЗ-238 составляет 109 дБ, что на 29 дБ превышает допустимые уровни шума. Уровни шума для двигателя ЯМЗ-238 превышают

предельно допустимые значения в 8 октавах из 9. Величины превышений составляют от 7 до 29 дБ, при этом максимальные величины превышений, составляющие 28...29 дБ, наблюдаются для высокочастотной части спектра 4000...8000 Гц. Это приводит к значительной усталости работника и, как следствие, к снижению его работоспособности и внимательности, что, в свою очередь, повышает риск несчастного случая или развития профессионального заболевания.

Наибольшее распространение шума приходится в направлении пульта управления и в направлении двери, через которую двигатель подается в бокс обкатки. В момент обкатки двигателя среднеоктавный уровень шума в боксе непосредственно вблизи обкатываемого двигателя составлял 105 дБ, а уровень шума у пульта – 98 дБ.

Таким образом, можно констатировать, что звукоизолирующая способность ограждающих конструкций бокса не обеспечивает защиту оператора от воздействия повышенного уровня шума, следовательно, требуется ее модернизация или сокращение продолжительности нахождения оператора у работающего двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андруш, В.Г. Подходы к выбору методики измерения уровня шума при стендовой обкатке ДВС / В.Г. Андруш, А.К. Евтух // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 марта 2015 г. / БГАТУ ; ред.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 196–199.
2. Гедроить, Г.И. Снижение шума тракторов / Г.И. Гедроить, А.Ф. Безручко // Агропанорама. – 2016. – № 6. – С. 2–4.
3. Насибулина, Б.М. Опасности производственной среды и способы защиты от них : учеб. пособие / Б.М. Насибулина, Е.Г. Локтионова, Т.Ф. Курочкина. – М. : КНОРУС, 2016. – 174 с.

Поступила 12.07.2017

NOISE LEVEL STUDY DURING RUNNING OF MOTOR AND TRACTOR ENGINES

V. ANDRUSH, T. KOT, A. EVTUKH

An increased noise level is considered as one of the most dangerous and harmful production factors for the operators of the rolling-testing stations. The carried out researches have shown that at bench run-in of automotive tractor engines YaMZ-238, D260 and D243 in conditions of engine repair plant, the YaMZ-238 engine generates the greatest noise level. The excess comes at medium and high frequencies, which leads to considerable fatigue of the employee and, as a consequence, to a decrease in his efficiency and attention, thereby increasing the risk of an accident or the development of occupational disease.

Keywords: *automotive engines running, harmful occupational factors, noise, increased level of performance, risk.*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков	2
<i>Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А.</i> Синтез и реализация рациональной схемы кругового точения деталей с профилем в виде треугольника Рело	9
<i>Кукареко В.А., Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Гвоздь Г.И.</i> Кинематическое и технологическое обеспечение формирования регулярного микрорельефа сферических поверхностей деталей комбинированной обработкой резанием	16
<i>Данилов А.А., Селицкий А.Н.</i> Анализ схемы ротационного точения некруглых поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом	26
<i>Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В.</i> Повышение прочности сварных соединений при дуговой сварке	34
<i>Дубко А.Г., Чвертко Н.А., Лебедев А.В.</i> Усовершенствование электродов электрохирургических инструментов многоразового применения	38
<i>Лоборева Л.А., Кожевников М.М.</i> Поиск траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями	43
<i>Асламов Ю.П., Асламов А.П., Давыдов И.Г., Цурко А.В.</i> Алгоритмы уточнения частоты вращения вала в задачах вибродиагностики роторного оборудования	51

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

<i>Лагереv Р.Ю., Капский Д.В., Иванов В.П., Вигерина Т.В.</i> Управление въездом потоков автомобилей на скоростные дороги высшей категории	59
<i>Кот Е.Н., Ярошевич В.К., Голович А.К., Иванов В.П.</i> Инженерное обустройство и режимы работы светофорных объектов на регулируемых пешеходных переходах	66
<i>Капский Д.В., Кот Е.Н., Щербак О.П., Вигерина Т.В.</i> Исследования особенностей участия в дорожном движении пешеходов	73
<i>Белоцерковский М.А., Жорник В.И., Ялович А.П., Дудан А.В.</i> Восстановление валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией	79

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ. ОХРАНА ТРУДА

<i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Майорова Е.И.</i> Получение сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса	84
<i>Факеев А.В., Покровская С.В., Бурая И.В., Антух К.П., Николин Д.С.</i> Синтез и исследование функциональных свойств высокощелочных беззольных сукцинимидных присадок для производства малозольных моторных масел	90
<i>Шевчук М.О., Безбородов В.С., Шишаков Е.П., Зильберглейт М.А., Якубовский С.Ф.</i> Проблемы и достижения переработки растительного сырья	95
<i>Булавка Ю.А., Петровская Ю.С., Ширабордина В.С.</i> Современные альтернативные направления промышленного использования низкомолекулярного полиэтилена	103
<i>Майтам Д.Н.</i> Сопоставление основных характеристик клапанной тарелки новой конструкции и прямооточной клапанной тарелки	111
<i>Головнев И.Э., Марцуйль В.Н.</i> Влияние ультразвуковой обработки на седиментационные и водоотдающие свойства суспензий активного ила	122
<i>Ющенко В.Д., Лесович Е.В., Самуйло В.Э., Шадуго Е.В.</i> Определение состава промывных вод скорых фильтров при биологической очистке подземных водоисточников от железа	129
<i>Мисун Ал. Л.</i> Оценка производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур	134
<i>Мисун Ал-др Л.</i> Безопасность труда на уборке кормовых культур	140
<i>Андруш В.Г., Кот Т.П., Евтух А.К.</i> Исследование уровня шума при обкатке автотракторных двигателей	145