

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, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

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, химической техники и технологии.

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.

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.

Редакторы Р.Н. Авласенок, О.В. Мальцева. Техн. редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 30.08.2013. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.

Усл. печ. л. 17,67. Уч.-изд. л. 21,29. Тираж 100 экз. Заказ 1296.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.7.026.6

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. А.П. ДОСТАНКО
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);
канд. техн. наук В.С. ТОМАЛЬ, канд. техн. наук Н.К. КАСИНСКИЙ
(НП РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», Минск);
д-р техн. наук, доц. И.А. ИВАНОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлена методика расчета воспроизводимости оптической толщины вакуумных покрытий. Исследовано влияние нагрева оптических деталей на воспроизводимость оптической толщины многослойных узкополосных фильтров второго порядка на основе окислов циркония и кремния, получаемых на вакуумных установках моделей ВУ-800, ВУ-2М и ВУ-1А. Предложено для более точной количественной оценки воспроизводимости оптической толщины вакуумных покрытий, кроме величины относительного стандартного отклонения, экспериментально определять величину доверительной вероятности.

Введение. Воспроизводимость свойств оптических вакуумных покрытий (ОВП) является важной характеристикой технологических процессов, реализуемых на конкретных вакуумных установках. В соответствии с требованиями ГОСТ воспроизводимость понимается как степень близости в рамках наперед заданного предела результатов повторных испытаний объекта или реализации процесса при одинаковых условиях этих испытаний [1]. На практике в ходе технологических процессов нанесения покрытий в вакууме эти условия лишь с большой натяжкой можно считать постоянными, так как процесс испарения, конденсации и формирования оптического покрытия является динамическим с большими отклонениями от стационарных условий даже на протяжении времени формирования одного слоя.

Современный технологический процесс нанесения ОВП определяется рядом как контролируемых (давление, температура, геометрические размеры напыляемой детали, форма и геометрические размеры приёмной поверхности, взаимное геометрическое расположение источников испарения, нагревателя и приёмной поверхности), так и неконтролируемых факторов (концентрация дефектов, угол падения потока на деталь, размеры кристаллитов, отклонение от стехиометрии, остаточная атмосфера) [2]. Среди большого количества контролируемых технологических параметров термический нагрев оптических деталей является важным этапом технологического процесса нанесения покрытий. От режима термообработки зависит качество выпускаемых изделий (такие показатели, как адгезия покрытия к стеклянной основе, структура покрытий и др.), а также производительность всего процесса. Цель данной работы – исследовать влияние нагрева оптических деталей на воспроизводимость оптической толщины ОВП.

Результаты и их обсуждение. Процесс нанесения ОВП последовательно реализовывали на вакуумных установках моделей ВУ-800, ВУ-1А, ВУ-2М, серийно выпускаемых на ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения». Многослойный узкополосный фильтр второго порядка на основе окислов циркония ZrO_2 и кремния SiO_2 наносили на детали диаметром 40 мм. Под оптической толщиной пленки t понимали величину

$$t = n \cdot h, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления; h – геометрическая толщина ОВП.

Для измерения оптической толщины пленки использовали прибор спектрометрического контроля СФКТ-751, который позволяет контролировать толщину оптического покрытия по отражению монохроматического света контрольной длины волны λ_k , выбираемой в области спектра 380...1000 нм, от отдельного контрольного образца [3].

Оптическую толщину ОВП определяли в 5-ти точках сферической приемной поверхности как в одном технологическом цикле, так и от цикла к циклу. Фильтры наносили на непрогретые и нагретые до 300 °С оптические детали. Оптическая толщина пленки определялась по положению длины волны, соответствующей максимуму пропускания фильтра λ_{max} . Неравномерность толщины по сферической приемной поверхности рассчитывалась по пяти точкам по следующей формуле:

$$\delta t = \frac{\lambda_{max}^1 - \lambda_{max}^5}{\lambda_{max}^1}, \quad (2)$$

где верхний индекс указывает на номер точки сферической приемной поверхности.

Температуру поверхности деталей измеряли термопарным методом. Для измерения температуры приемная поверхность делилась на десять сферических зон в форме концентрических слоев с одинаковой площадью поверхности. Нулевая зона соответствует положению оптической детали на оси приемной поверхности. Испаритель располагали на расстоянии 250 мм от оси приемной поверхности (рис. 1).

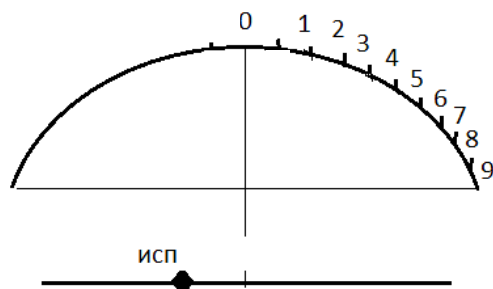


Рис. 1. Относительное расположение испарителя и сферических зон на приемной поверхности в вакуумной камере: 0...9 – номер сферической зоны (места расположения деталей); исп – испаритель

Испаритель располагали на расстоянии 250 мм от оси приемной поверхности (рис. 1).

Нагрев оптических деталей, находящихся на приемной поверхности, определяется тепловым потоком как от внешних нагревательных устройств, так и от испарителя. Из-за сферической формы приемной поверхности плотность поглощенного потока максимальна в центре этой поверхности и уменьшается к её периферии. Исследования показали, что распределение температуры по приемной поверхности зависит от радиуса ее кривизны. С ростом радиуса кривизны график распределения становится более пологим. Перепад температуры от центра к периферии уменьшается (рис. 2).

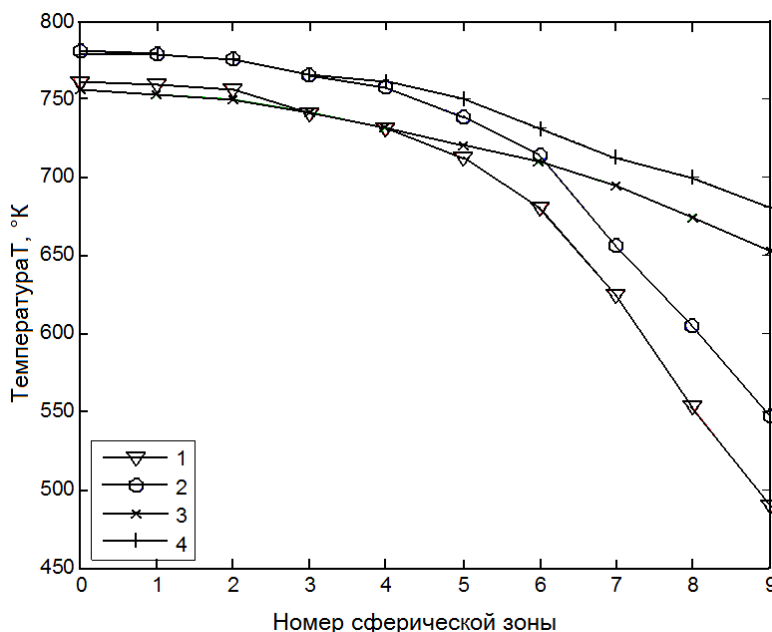


Рис. 2. Распределение температуры по приемной поверхности. Радиус кривизны поверхности: 1, 2 – 0,385 м; 3, 4 – 1,0 м. Нагрев поверхности: 2, 4 – от испарителя и нагревателя; 1, 3 – только от испарителя

В случае плоской приемной поверхности перепад температур минимален. Однако на плоской приемной поверхности неравномерность толщины ОВП достигает 35 %. Таким образом, сферическая форма приемной поверхности является необходимой для получения равномерных по толщине ОВП.

Для экспериментального изучения воспроизводимости оптической толщины ОВП от процесса к процессу многослойный узкополосный фильтр наносили при одних и тех же технологических режимах для нескольких последовательно загружаемых партий оптических деталей. Величина максимума пропускания фильтра λ_{\max}^i для разных партий представлена в таблице 1. Измерения проводили на оптических деталях, расположенных на позиции 1 (см. рис. 1).

Таблица 1

Результаты контроля оптической толщины ОВП

№ загрузки	3	4	5	6	8	9
λ_{\max}^i	660	630	650	620	670	650
λ_{\max}^{cp}	646,6					
Величина эмпирического стандарта, S	18,62					

Величину эмпирического стандарта вычисляли по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{\max}^i - \lambda_{\max}^{cp})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $n = 6$;

$$\lambda_{\max}^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{\max}^i. \quad (4)$$

В качестве меры воспроизводимости используем относительное стандартное отклонение s_r , [4], в процентах:

$$s_r = \frac{S}{\lambda_{\max}^{cp}} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Тогда для данных, приведенных в таблице 1, относительное стандартное отклонение s_r составит 2,9 %. Следовательно, воспроизводимость (B), т.е. повторяемость оптической толщины ОВП от процесса к процессу, при одинаковых технологических режимах их осаждения будет определена по формуле:

$$B = 1 - s_r, \quad (6)$$

она составит 97,1 %.

Для более точной оценки воспроизводимости оптической толщины кроме знания величины отклонения $\Delta\lambda_{\max}$ необходимо задать и величину доверительной вероятности проводимых оценок. Другими словами, требуется знание того, что результат измерения оптической толщины ОВП отличается от истинного значения λ_{\max} на величину, большую $\Delta\lambda_{\max}$. Для получения таких характеристик используем интервальную оценку результатов измерений λ_{\max} .

Так как точное значение дисперсии нам неизвестно и мы пользуемся рассчитанной по результатам эксперимента эмпирической дисперсией, то для оценки величины доверительного интервала воспользуемся следующей формулой [4]:

$$\Delta\lambda_{\max} = t(P, k) \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где $t(P, k)$ – коэффициент Стьюдента; P – доверительная вероятность; k – степень свободы ($k = n - 1$).

Результаты оценки воспроизводимости технологического процесса нанесения узкополосного фильтра в зависимости от величины доверительного интервала, воспроизводимости от уровня значимости для заданного числа измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Определение величины доверительного интервала, воспроизводимости от уровня значимости для заданного числа измерений

Уровень значимости, $\alpha = 1 - B$	$t(P, k)$	$\Delta\lambda_{\max}$	Относительное максимальное отклонение, $\delta = \Delta\lambda_{\max} / \lambda_{\max}^{cp}$, %	Воспроизводимость, B , %
0,05	2,57	19,53	3,0	97
0,03	3,1	23,56	3,6	96,4
0,02	3,37	25,61	4,0	96
0,015	4,03	30,63	4,7	95,3

Таким образом, уровень воспроизводимости 97 % соответствует доверительной вероятности 95 %. Следовательно, количество годных деталей в каждом технологическом цикле не превышает 92,15 %: $(0,97 \cdot 0,95) \cdot 100 \% = 92,15 \%$.

Влияние положения оптической детали на сферической приёмной поверхности на воспроизводимость оптической толщины ОВП исследовали как для случая осаждения покрытий на детали, прогреваемые до 300 °С, так и на детали, осаждаемые без предварительного прогрева (рис. 3). Исследования показали, что воспроизводимость оптической толщины уменьшается при переходе к «нагревной» технологии нанесения ОВП. Воспроизводимость в одном процессе при нанесении ОВП на детали, нагреваемые до 300 °С, составляет 84 %, а при нанесении на непрогреваемые детали – 99 %. При этом при формировании ОВП на ненагретых оптических деталях воспроизводимость уменьшается от центра к периферии приемной поверхности (рис. 3, а). Для осаждения оптических покрытий на предварительно прогреваемые детали,

наоборот, уменьшение наблюдается от периферии к оси (рис. 3, б). Последний эффект, по всей вероятности, связан с неравномерностью нагрева приемной сферической поверхности (см. рис. 2) и возникновением эффекта реиспарения, вызываемого перегревом деталей в позициях 0, 1 и 2 (см. рис. 1).

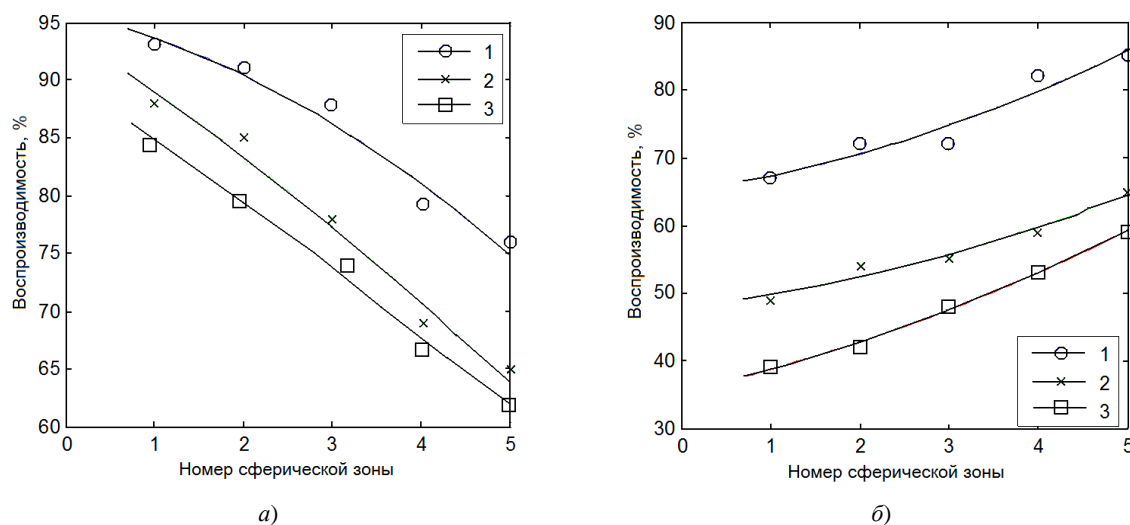


Рис. 3. Зависимость воспроизводимости от положения оптической детали на сферической приемной поверхности при нанесении покрытий на непрогреваемые (а) и предварительно прогреваемые (б) детали:
1 – 1,5 %; 2 – 2 %; 3 – 3 %

Заключение. Воспроизводимость оптической толщины ОВП уменьшается при использовании предварительного нагрева оптических деталей до 300 °С и составляет 84 %. Наименьшая воспроизводимость в этом случае наблюдается на деталях, расположенных наиболее близко к оси сферической приемной поверхности, что, по всей видимости, связано с неравномерностью нагрева этой поверхности. При нанесении ОВП на непрогреваемые оптические детали воспроизводимость по оптической толщине составляет 99 %. С ростом радиуса кривизны приемной поверхности неравномерность её прогрева уменьшается, однако растет неравномерность толщины осаждаемых ОВП.

Предложено для более точной количественной оценки воспроизводимости оптической толщины ОВП, кроме величины относительного стандартного отклонения, экспериментально определять величину доверительной вероятности. Предложен подход к расчету процента выхода годных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений: ГОСТ Р ИСО 5725-1. – Минск, 2002. – Ч. 1: Основные правила и определения.
2. Томаль, В.С. Воспроизводимость свойств оптических вакуумных покрытий. Материалы. Технологии. Инструменты / В.С. Томаль, Н.К. Касинский, И.В. Иванов. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 75 – 77.
3. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов [и др.]; под ред. М.А. Окатова. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
4. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по теории вероятности, математической статистике и случайным процессам / Д.Т. Письменный. – М.: Айрис-Пресс, 2008. – 320 с.

Поступила 04.06.2013

METHOD OF CALCULATING THE REPRODUCIBILITY OF OPTICAL VACUUM COATING THICKNESS

A. DOSTANKO, V. TOMAL, N. KASINSKI, I. IVANOV

Methodology of calculation of reproducibility of optical vacuum coating thickness is presented. The influence of heating of the optical parts on the reproducibility of the optical thickness of the multilayer narrow-band filters of second order on the basis of oxide ZrO_2 and SiO_2 , received on vacuum systems models BY-800, BY-2M and BY-1A is studied. For better quantitative estimation of the reproducibility of the optical thickness of the vacuum coating, apart from the relative standard deviation it is proposed to experimentally determine the value of confidential probability.

УДК 621.91.04

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМАХ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены основные типы кинематических цепей, обеспечивающих реализацию функциональных связей в формообразующих системах технологического оборудования. Представлено описание их кинематических и геометрических характеристик посредством структурных формул компоновки станка, кинематики формообразования и кинематических схем обработки. Определены основные этапы реализации функциональных связей при разработке формообразующих систем новых и модернизируемых станков, учитывающие кинематический и компоновочный факторы, что позволяет минимизировать количество блоков компоновки при сохранении технологических возможностей станка за счет оптимизации его кинематической структуры. На примере токарно-затыловочного станка показана возможность повышения универсальности станочного оборудования путем формирования и реализации новых функциональных связей в формообразующей системе.

Введение. Структура формообразующей системы станка определяется в значительной мере функциональными связями между исполнительными органами, несущими инструмент и заготовку, а также между ними и приводами. Функциональные связи обеспечивают передачу энергии исполнительным органам от источника движения, создание и согласование их движений. Они осуществляются посредством кинематических цепей, которые в зависимости от вида согласуемых движений (вращательное B , поступательное $П$, осциллирующее O , качательное K) соединяемых элементов делятся на следующие основные типы:

- цепи типа $(B - B)$, связывающие вращающиеся ведущий и ведомые элементы (вал двигателя, исполнительные органы);
- цепи типа $(B - П)$, связывающие вращающийся и поступательно перемещающийся элемент, каждый из которых может быть ведущим или ведомым;
- цепи типа $(П - П)$, связывающие между собой поступательно перемещающиеся элементы;
- цепи типа $(B - O)$, $(B - K)$, связывающие между собой вращающиеся и возвратно-поступательно перемещающиеся или совершающие качательные движения исполнительные органы;
- цепи $(П - O)$, связывающие между собой поступательно перемещающиеся и возвратно-поступательно перемещающиеся звенья.

Функциональная связь может быть реализована кинематической цепью механического, немеханического или комбинированного типов, содержащей соответствующий орган настройки ее передаточного отношения (зубчатый или кулачковый механизм, аналоговое или числовое устройство программного управления и т.п.).

Синтез и разработка средств реализации функциональных связей относятся к схемотехническому и геометрическому проектированию формообразующих систем технологического оборудования. Рациональное построение функциональных связей важно для обеспечения заданных технико-экономических показателей создаваемого станка, в частности его универсальности. Эта задача является предметом анализа в данном исследовании.

Отображение функциональных связей формообразующей системы станка. Необходимые для формообразования поверхности функциональные связи разрабатываются исходя из общей схемы обработки поверхности [1], кинематики формообразования и кинематической схемы обработки [2]. Формообразование поверхности методами механической и физико-технической обработки возможно при определенных функциональных связях между исполнительными органами станка, несущими инструмент и заготовку. По назначению эти связи разделяются на кинематические и геометрические, первые из которых устанавливают взаимосвязь, соотношение скоростей и направлений элементарных движений, образующих исполнительные движения, в соответствии с параметрами формируемой поверхности и реализуются кинематикой станка. Геометрические связи обеспечивают взаимное расположение и возможность относительного перемещения блоков, входящих в ветви инструмента и заготовки компоновки станка. Пути реализации функциональных связей разрабатываются на этапах схемотехнического и компоновочного проектирования станка, учитывая, что траектория движения формообразования может обеспечиваться кинематическим и геометрическим методами. Например, траектория исполнительного движения в

виде окружности может быть сформирована как геометрически, за счет ее физического аналога (подшипника, круговой направляющей), так и кинематически, за счет сложного формообразующего движения, создаваемого двумя согласованными элементарными движениями (поступательными, вращательными).

Комплексное представление в формализованном виде функциональных связей обрабатывающей системы возможно с использованием структурных формул компоновки станка [3], кинематики формообразования и кинематических схем обработки [4], содержащих необходимую для этого информацию.

Так, совокупность подвижных блоков, их расположение в ветвях инструмента и заготовки компоновки станка и перемещений в системе его координат отражается в структурной формуле координатной компоновки станка. Например, структурная формула координатной компоновки вертикально-фрезерного станка [3] $K = XYZOC^s$ показывает, что его обрабатывающая система содержит в ветви заготовки три блока: X, Y, Z , имеющих возможность поступательного перемещения вдоль соответствующих осей x, y, z прямоугольной системы координат, и один блок C в ветви инструмента, вращающийся вокруг оси z . Однако структурная формула компоновки не отражает кинематические связи между ее подвижными блоками.

Кинематические и геометрические характеристики функциональных связей отражаются в структурной формуле схемы формообразования в виде совокупности определителей ее существенных признаков в соответствии с формой обработанной поверхности и параметрами исполнительных движений [4]. Такими признаками являются: метод формообразования поверхности; общая схема обработки; параметры, характеризующие инструмент, кинематику формообразования и кинематическую схему обработки. В структурной формуле схемы формообразования каждый признак отображается условными обозначениями, составляющими определитель данного признака.

Например, определитель метода формообразования поверхности включает в себя описание методов генерации её производящих линий (например, $Ob^u - Kc$). Формообразующие инструменты различаются типом и формой производящих элементов, поэтому определитель инструмента отражает их тип (поверхность, линия, точка, множество линий или точек), форму производящей поверхности (цилиндрическая, коническая, винтовая, фасонная) или образующей (прямая, окружность, эвольвента и т.п. или множество линий). В общем случае этот определитель содержит дополнительную информацию (о взаимном расположении и ориентации производящих элементов, их количестве, геометрических параметрах и др.), необходимую для реализации схемы формообразования. Определитель пространственных параметров общей схемы обработки задает множество геометрических осей, направлений и плоскостей координатных перемещений инструмента и заготовки и их относительное расположение в соответствии с реализуемой общей схемой обработки [4], что необходимо для проектирования компоновки станка.

Определитель кинематики формообразования отражает общее количество и тип элементарных движений, характер изменения скоростей элементарных движений (постоянные, переменные), взаимосвязь элементарных движений, структуру исполнительных движений, их характеристику по назначению и скорости (главное – движение подачи). При необходимости неравномерность (\sim) или дискретность (периодичность) (∂) движения, например, $\tilde{B}_u, \Pi^\partial$. Движение, сообщаемое заготовке, обозначается дополнительно штрихом, например, Π'_z, B'_w . Задаются оси координатных перемещений ($B_u, \Pi_z, \Pi_{x/y}$ и т.п.). Эта информация является основой синтеза кинематической структуры станка.

Описание структуры исполнительного движения должно отражать его функциональное назначение (движения формообразования Φ , врезания Bp , деления D и т.д. [5]), составляющие его элементарные движения и, при необходимости, соотношение их направлений, например, $\Phi_v(B_u, B'_w)$. В упрощенных структурных формулах достаточно буквенно-цифрового обозначения, отражающего необходимую для создания исполнительного движения взаимосвязь составляющих его элементарных движений, например, $\Phi_s(B_1 \Pi_2)$. Конкретизация параметров функциональной связи обеспечивается заданием соотношения скоростей элементарных движений, например, таких как $[\Phi_v(B'_1, B_2), \omega_1 / \omega_2 = m; \Phi_s(\Pi_3 \Pi_4), S_1 / S_2 = tg \alpha]$, что необходимо для ее реализации.

Таким образом, структурная формула схемы обработки, отражая функциональные связи в обрабатывающей системе, служит основой построения кинематической структуры и компоновки реализующего его станка. Этапы проектирования кинематики и компоновки станка взаимосвязаны, так как они совместно обеспечивают траектории исполнительных движений, их относительное положение и расположение в системе координат станка.

Связь кинематического и компоновочного факторов в реализации функциональных связей. Компоновка станка включает промежуточные и конечные подвижные блоки, расположенные определенным образом на неподвижном блоке и соединенные между собой функциональными связями в соответствии с его кинематической структурой. Конечными подвижными блоками являются исполнительные

органы, несущие инструмент и заготовку. Совокупность подвижных блоков от исполнительного органа до неподвижного блока образует соответствующую ветвь компоновки (инструмента или заготовки) [3].

Относительные перемещения исполнительных органов образуют движения формообразования, деления, установки, врезания, ориентации и вспомогательные движения с определенными кинематическими и геометрическими параметрами в соответствии с реализуемыми на станке общими и кинематическими схемами обработки. Поэтому проектирование компоновки, определяющей геометрические параметры движений, связано с синтезом кинематических схем обработки и кинематической структурой станка, обеспечивающей их кинематические параметры. Ввиду этого реализация функциональных связей включает решение следующих задач кинематического и компоновочного проектирования станков:

- синтез рациональных общих схем обработки, определяющих положение и форму траекторий исполнительных движений в процессе обработки [1];
- разработка кинематики формообразования, обеспечивающей относительное перемещение инструмента и заготовки в процессе обработки заданной поверхности или множества конгруэнтных поверхностей, формирование на этой основе состава необходимых исполнительных движений (формообразования, деления, ориентации и др.) и кинематической схемы обработки [2];
- разработка технологической компоновки станка, отражающей расположение и количество исполнительных органов, несущих заготовки и инструменты, рабочих и загрузочных позиций, устройств для смены заготовок и инструментов и т.д. [6];
- формирование соответствующих исполнительных пар (поступательных, вращательных, винтовых) для осуществления элементарных движений исполнительных органов и функциональных связей в обрабатывающей системе исходя из реализуемых схем формообразования [5];
- синтез кинематической структуры станка с учетом функциональных связей между структурными элементами [5, 7];
- формирование количества и состава технологических модулей и технологических комплектов [3];
- определение типов и количества блоков компоновки в ветвях инструмента и заготовки, достаточного, т.е. минимально необходимого, для реализации необходимых функциональных связей в обрабатывающей системе;
- графическое и информационное представление координатной компоновки и компоновочно-кинематической схемы [8].

Содержание указанных этапов отражает взаимосвязь проектирования кинематики и компоновки станка, в частности связь между выполняемыми функциями и структурой компоновки станка выражается посредством технологических модулей, формируемых из блоков компоновки [3]. Под технологическим модулем понимается количество блоков, необходимых для создания определенного исполнительного движения. Одноэлементарное исполнительное движение создается простым, а многоэлементарное – сложным технологическим модулем. Число подвижных блоков в сложном технологическом модуле равно числу элементарных движений, образующих создаваемое этим модулем исполнительное движение. Совокупность блоков компоновки совместно с кинематическими связями между ними может образовывать один технологический модуль (специальные станки) или множество технологических модулей (универсальные станки), т.е. совокупность технологических модулей, обеспечиваемых данной компоновкой, характеризует универсальность станка по форме обрабатываемых поверхностей.

Одно из направлений совершенствования конструкций станков – уменьшение количества подвижных блоков компоновки при тех же функциональных связях, определяющих технологический потенциал станка, что возможно, например, при выполнении одним блоком формообразующего и наладочного движений.

Требование минимизации количества подвижных блоков обеспечивается за счет оптимизации кинематической структуры станка, реализующей функциональные связи между ними. Пусть требуется сообщить исполнительному органу по одной координате два прямолинейных движения P_1 и P_2 , например, движение формообразования $\Phi_s(P_1)$ и вспомогательное (наладочное) движение $Vcn(P_2)$, т.е. реализовать две функциональные связи. При этом оба движения могут выполняться как в одном, так и в противоположном направлениях одновременно или не совпадать во времени.

Возможны два варианта компоновки устройства, осуществляющего эти движения. В первом варианте компоновка включает два подвижных блока 1 и 2 (рис. 1, а), из которых блок 1, установленный подвижно на блоке 2, выполняет движение P_1 , а блок 2, установленный с возможностью перемещения по основанию 3, – движение P_2 . Во втором варианте компоновка имеет один подвижный блок 1 (рис. 1, б), установленный на основании 2.

Выполнение условия минимизации числа подвижных блоков возможно лишь при соответствующей кинематической структуре устройства. Кинематическая структура устройства, компоновка которого выполнена по первому варианту (см. рис. 1, а), имеет две поступательные кинематические пары: одна находится между подвижными блоками 1 и 2, другая – между подвижным блоком 2 и неподвижным бло-

ком 3. Конечным исполнительным органом является блок 1. Он получает движение Π_1 от двигателя M_1 , а также движение Π_2 совместно с промежуточным подвижным блоком 2 от двигателя M_2 . Соединение кинематических групп, создающих движения Π_1 и Π_2 , осуществляется через промежуточное звено 2.

Кинематическая структура устройства, компоновка которого выполнена по второму варианту (см. рис. 1, б), имеет одну поступательную исполнительную пару, общую для групп движений $\Phi_s(\Pi_1)$ и $V_{cn}(\Pi_2)$, которые соединены между собой по внешним связям через суммирующий механизм Σ , принадлежащий внешним связям обеих групп. Поэтому подвижный блок 1 в данном случае выполняет движения Π_1 и Π_2 , осуществляемые или одновременно, или раздельно в одном или разных направлениях. Данная структура по сравнению с первой при тех же технологических возможностях позволяет выполнить конструкцию исполнительного механизма более компактной и с более высокой жесткостью при меньшей массе благодаря уменьшению числа подвижных блоков.

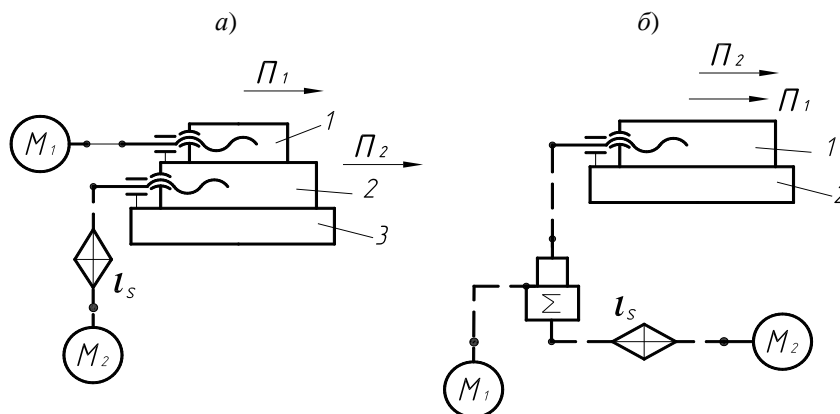


Рис. 1. Варианты компоновки исполнительного устройства для осуществления двух движений двумя подвижными блоками (а) или одним подвижным блоком (б)

Следует отметить, что графическое изображение компоновки не раскрывает без ее описания функциональные связи между ее блоками и с источниками движений и не позволяет установить возможные технологические модули. Поэтому для определения количества технологических модулей, обеспечиваемых данной компоновкой, необходимо знать реализуемые кинематической структурой функциональные связи между блоками компоновки.

Возможность формирования различных технологических модулей при минимальном числе блоков компоновки характеризует совершенство кинематической структуры станка, набора обеспечиваемых ею функциональных связей. Практика показывает, что потенциальные возможности компоновки станка по образованию технологических модулей зачастую не раскрываются при проектировании станка и не используются в полной мере при его эксплуатации. Разработка новых технологических модулей на базе существующей компоновки является основой расширения технологических возможностей станка без усложнения его конструкции.

Таким образом, совокупность технологических модулей, создаваемых данной компоновкой, характеризующая универсальность станка по форме обрабатываемых поверхностей, может быть определена только с учетом его кинематической структуры. Это обстоятельство обуславливает взаимосвязь этапов проектирования кинематической структуры и компоновки станка, необходимость разработки компоновки в соответствии с требуемыми кинематическими связями.

Так как функциональные связи реализуются совместно кинематической структурой и компоновкой станка, то разработка компоновки связана с синтезом кинематической структуры. В частности, решение задачи минимизации блоков компоновки предполагает синтез рациональной кинематической структуры станка. И наоборот, придание станку новых функций при заданном числе блоков компоновки возможно за счет рационального построения кинематической структуры, устанавливающей требуемые функциональные связи между подвижными блоками компоновки и объединяющей их в технологические модули.

Количество технологических модулей, возможных при заданной компоновке, зависит от реализуемых кинематической структурой функциональных связей между блоками компоновки. Раскрытие и реализация дополнительных функциональных связей, обеспечиваемых кинематической структурой и компоновкой станка, позволяет расширить его технологические возможности, что выражается в возможности обработки на нем иных поверхностей. Это подтверждают исследования и практические разработки по использованию токарно-заточных станков для обработки профильных цилиндрических [9] и крутовых винтовых поверхностей [10].

Типовая кинематическая структура токарно-затыловочного станка позволяет реализовать две функциональные связи между вращением шпинделя и движениями резца в поперечном и продольном направлениях. Посредством первой функциональной связи между вращением шпинделя и перемещением суппорта в плоскости вращения шпинделя с помощью механизма профилирования кулачкового типа осуществляется формирование образующей (поперечного сечения) обработанной поверхности, например в виде спирали Архимеда при затыловании режущих инструментов. Эта функциональная связь выражается исполнительным движением $\Phi_1(B_1\Pi_2)$, траектория которого определяется профилем кулачка – материального носителя образующей формируемой поверхности. Форма образующей может быть видоизменена за счет соответствующего профиля кулачка, что позволяет формировать поперечные сечения обработанных поверхностей, ограниченные различными контурными кривыми, например, в виде многоугольника с криволинейными сторонами, окружности, эксцентрично расположенной относительно оси вращения, и др.

Вторая функциональная связь между инструментом и заготовкой служит для образования направляющей обработанной поверхности, которая может быть прямой или винтовой линией, что выражается структурой исполнительного движения соответственно $\Phi_3(\Pi_3)$ и $\Phi_3(B_1\Pi_3)$. Это позволяет на токарно-затыловочном станке выполнять несвойственные ему операции, в частности обработку некруглых цилиндрических поверхностей деталей профильных моментопередающих соединений и круговых винтовых поверхностей роторов одновинтовых насосов.

Рассмотрим пример реализации функциональной связи между движениями заготовки 1 (рис. 2) и резца 2 при обработке профильных поверхностей на токарно-затыловочном станке. Форма поперечного сечения обработанной поверхности определяется законом возвратно-поступательного перемещения резца, задаваемым кулачком 4, посредством плоского толкателя 3.

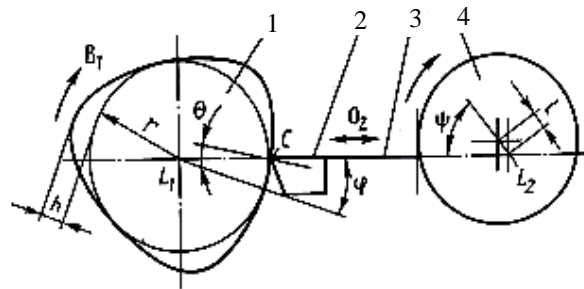


Рис. 2. Схема профилирования некруглой поверхности

Так, при гармоническом законе перемещения резца 2 на заготовке 1 образуется синусоидальный профиль [4], вершины которого отстоят на расстоянии h от вписанной в профиль окружности радиусом r . Такой закон перемещения производящей точки C создается при равномерном вращении круглого кулачка 4 вокруг оси L_2 , отстоящей от его геометрической оси на расстояние l .

Равномерное вращение кулачка 4 преобразуется в возвратно-поступательное перемещение δ производящей точки C (вершины резца 2).

$$\delta = l(1 - \cos \psi), \quad (1)$$

где ψ – угол поворота кулачка.

В результате на вращающейся вокруг оси L_1 заготовке 1 образуется некруглый профиль с равномерно расположенными по окружности выступами высотой $h = 2l$, количество которых $m = \psi / \varphi$, где φ – угол поворота заготовки.

Уравнение образуемого профиля в полярных координатах ρ и φ имеет вид:

$$\rho = r + l(1 - \cos m\varphi), \quad (2)$$

где r – радиус вписанной в него окружности.

Учитывая, что $r + l = R$, где R – средний радиус профиля, имеем

$$\rho = R - l \cos m\varphi. \quad (3)$$

Из (3) следует, что форма профиля зависит от параметров R , l и m . Для заданного числа выступов m в зависимости от отношения l/R она может быть выпуклой или выпукло-вогнутой. Синусоидальный профиль не имеет вогнутых участков, если

$$l/R \leq 1/(m^2 + 1). \quad (4)$$

Следует отметить, что реализация рассматриваемой функциональной связи возможна при выполнении условия проходимости инструмента, что связано с анализом изменения рабочих углов резца, имеющего определенные ограничения. При выпуклой форме профиля они изменяются в меньшем диапазоне, величина которого равна удвоенному значению угла θ между направлением радиуса-вектора и нормалью к профилю.

Для синусоидального профиля

$$\theta = \left| \arctg \frac{-l m \sin m\varphi}{R + l \cos m\varphi} \right|,$$

откуда следует, что максимальное значение θ имеет место при

$$\varphi = m^{-1} \arccos(-l/R). \quad (5)$$

С учетом θ_{\max} должен задаваться задний угол резца для обеспечения его проходимости (непересечения задней поверхности резца с формируемой поверхностью).

Аналогично реализуются на токарно-затыловочном станке функциональные связи между движениями инструмента и заготовки и при обработке круговых винтовых поверхностей (рис. 3).

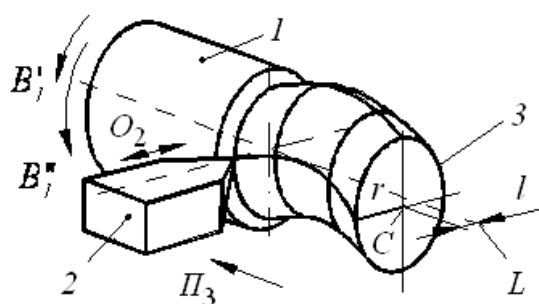


Рис. 3. Схема точения круговой винтовой поверхности

Поперечное сечение круговой винтовой поверхности S представляет окружность 3, эксцентрично расположенную относительно ее оси L . Такая поверхность описывается параметрическими уравнениями [11]:

$$\begin{cases} x = l \cos \beta + r \cos(\alpha + \beta); \\ y = l \sin \beta + r \sin(\alpha + \beta); \\ z = p\beta, \end{cases} \quad (6)$$

где r – радиус производящей окружности; α – угол поворота в поперечном сечении точки приложения нормали к винтовой поверхности; β – угол поворота поперечного сечения вокруг оси винтовой поверхности; l – расстояние от центра поперечного сечения до оси винтовой поверхности; $p = H/2\pi$ – параметр винта; H – шаг винтовой поверхности.

Учитывая геометрию круговой винтовой поверхности, она формируется при сообщении производящей окружности винтового движения. Направляющей поверхности служит винтовая линия, расположенная на цилиндрической поверхности, радиус которой равен смещению (эксцентриситету A) центра окружности от оси винтовой поверхности.

Из множества возможных методов формирования круговых винтовых поверхностей более простым в реализации является метод, согласно которому образующая в виде окружности и винтовая направляющая формируются методом следа точечным производящим элементом – вершиной резца 2. При этом производящая окружность формируется в результате согласованных возвратно-поступательного движения O_2 резца 2 перпендикулярно геометрической оси L заготовки 1 и вращения B_1' последней вокруг этой оси. Параметры возвратно-поступательного движения резца таковы, что центр C формируемой окружности в любой момент времени отстоит от геометрической оси L заготовки на величину эксцентриситета профиля l .

Необходимое для формирования круговой винтовой поверхности перемещение Π_3 образуемой окружности по винтовой линии заданного шага осуществляется за счет дополнительного вращения B_1'' заготовки вокруг своей геометрической оси, согласованного с поступательным движением Π_3 резца параллельно оси L заготовки. Следовательно, круговая винтовая поверхность формируется двумя сложны-

ми исполнительными движениями – движением резания $\Phi_v(B'_1 BO_2)$ и винтовым движением подачи $\Phi_s(B''_1 П_3)$. Кинематика формообразования круговой винтовой поверхности в формализованном виде выражается определителем $[\Phi_v(B'_1 O_2), \Phi_s(B''_1 П_3)]$, устанавливающим требуемые функциональные связи в формообразующей системе. Таким образом, для формирования круговой винтовой поверхности необходимы две функциональные связи, первой из которых обеспечивается согласование элементарных движений B'_1 и O_2 для образования эксцентрично расположенной окружности, а второй – согласование движений B''_1 и $П_3$ для создания винтового движения определенного шага.

В соответствии с изложенным возможен вариант реализации схемы формообразования круговых винтовых поверхностей, когда эксцентрично расположенная производящая окружность радиусом r формируется кинематически, в результате согласования посредством механизма-построителя (кулачка с толкателем) вращательного движения B'_1 шпинделя с заготовкой и осциллирующего движения O_2 поперечного суппорта с резцом. Для перемещения производящей окружности по винтовой линии дополнительное вращательное движение B''_1 шпинделя с заготовкой вокруг своей геометрической оси согласуется с поступательным движением $П_3$ резца параллельно этой оси.

При осуществлении указанных связей образуется круговая винтовая поверхность с заданными эксцентриситетом l и шагом H .

Так как вращение заготовки и возвратно-поступательное движение резца взаимосвязаны, то для формирования винтовой линии дополнительное вращение B''_1 можно заменить дополнительным возвратно-поступательным движением O_4 резца. Такой метод получения винтовой линии применяется, в частности, при затыловании режущих инструментов с винтовыми режущими кромками, что является основанием для использования токарно-затыловочных станков для обработки круговых винтовых поверхностей.

Кинематическая структура и компоновка станка для обработки круговых винтовых поверхностей должны обеспечивать реализацию функциональных связей, необходимых для формирования производящих линий (окружности и винтовой линии), и возможность настройки их геометрических параметров (диаметра, эксцентриситета, шага и направления винтовой поверхности). Для этого кинематическая структура должна содержать две сложные кинематические группы: группу движения профилирования и группу винтового движения, а компоновка станка должна обеспечивать возможность перемещения блока с инструментом в двух взаимно перпендикулярных направлениях – в плоскости вращения шпинделя с заготовкой и вдоль его оси. Этим условиям удовлетворяют компоновка и кинематическая структура токарно-затыловочного станка (рис. 4).

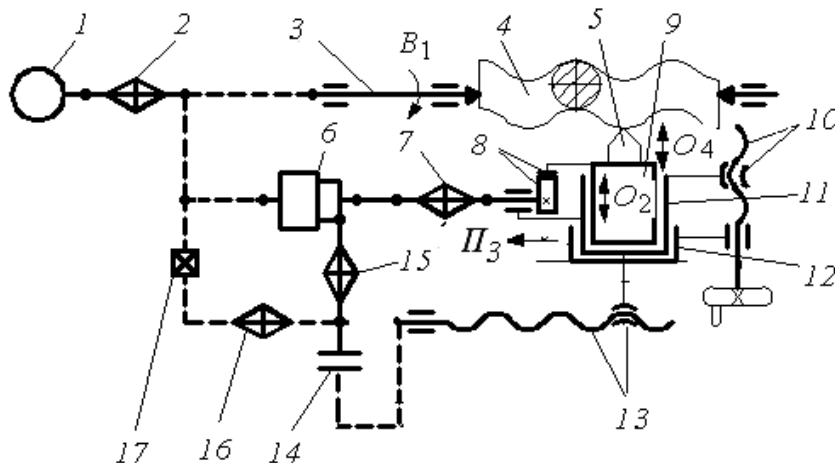


Рис. 4. Структурная схема станка для обработки круговых винтовых и некруглых цилиндрических поверхностей

Исполнительными органами станка являются шпиндель 3, поперечный 11 и продольный 12 суппорты, снабженные тяговыми устройствами, соответственно 10 и 13, для перемещения этих суппортов. Шпиндель, несущий заготовку 4, кинематически через орган настройки частоты его вращения 2 связан с двигателем 1. Тяговое устройство 13 соединено со шпинделем 3 кинематической цепью, содержащей орган настройки 16 скорости перемещения продольного суппорта (подачи) и реверсивный механизм 17 для настройки направления этого движения. На поперечном суппорте 11 смонтирован кулачковый меха-

низ-построитель 8 для сообщения возвратно-поступательного движения каретке 9, который связан со шпинделем кинематической цепью, содержащей суммирующий механизм 6 и орган настройки 7. Последний служит для задания соотношения между частотой вращения шпинделя и чистотой двойных ходов каретки 9, что необходимо при затыловании, обработке некруглых цилиндрических поверхностей с равномерно расположенными выступами (см. рис. 2) и каналовых винтовых поверхностей. Через суммирующий механизм 6 механизм 8 связан также с тяговым устройством 13, что позволяет сообщать каретке с инструментом 5 дополнительное движение O_4 , необходимое для получения на заготовке винтовой поверхности, шаг которой настраивается органом 15.

Муфта 14 предназначена для отключения движения O_4 , когда оно не требуется для обработки заданной поверхности, например, некруглой цилиндрической.

Кинематическая структура станка позволяет создавать множество частных кинематических структур, обеспечивающих обработку различных поверхностей. Рассмотрим частную кинематическую структуру, соответствующую обработке круговых винтовых поверхностей.

Данная структура содержит две сложные кинематические группы: группу движения профилирования $\Phi_1(B_1O_2)$ (образования производящей окружности) и группу движения $\Phi_3(P_3O_4)$, обеспечивающего образование винтовой направляющей. Структура исполнительных движений определяет необходимые функциональные связи в формообразующей системе станка, реализуемые посредством соответствующих кинематических цепей между его исполнительными органами, несущими заготовку и инструмент.

Внутренняя связь группы движения профилирования выполнена в виде кинематической цепи, связывающей шпиндель 3 с кулачком механизма 8 через суммирующий механизм 6 и орган настройки 7. Внешняя связь этой группы передает движение от двигателя 1 во внутреннюю связь через орган настройки 2 скорости исполнительного движения.

Внутренняя связь второй кинематической группы соединяет тяговое устройство 13 с кулачком механизма 8 через орган настройки 15, суммирующий механизм 6 и орган настройки 7. Движение от двигателя 1 передается в эту связь через органы настройки 2, 17 и 16.

Станок настраивается в соответствии с режимом резания и параметрами обрабатываемой круговой винтовой поверхности (диаметр ее поперечного сечения, эксцентриситет профиля, шаг и направление винтовой поверхности).

При настройке станка диаметр поперечного сечения (производящей окружности) устанавливается перемещением поперечного суппорта 11 поперек станины, эксцентриситет профиля обеспечивается установкой в механизме 8 возвратно-поступательного движения каретки 9 сменного кулачка соответствующей формы; шаг получаемой винтовой поверхности настраивается органом 15, а ее направление (левое или правое) – реверсивным механизмом 17.

Частота вращения шпинделя с заготовкой и подача продольного суппорта настраиваются соответственно органами 2 и 16.

При обработке круговой винтовой поверхности станок работает следующим образом. Шпиндель 3 с заготовкой 4 получают от двигателя 1 вращение B_1 с частотой, настроенной органом 2, а каретка 9 с инструментом 5 – возвратно-поступательное (осциллирующее) движение O_2 , согласованное с вращением шпинделя. В результате осуществления этих движений на заготовке 4 инструментом 5 формируется заданный профиль поперечного сечения круговой винтовой поверхности – окружность определенного радиуса.

Одновременно с указанными движениями получает прямолинейное перемещение P_3 продольный суппорт 12, благодаря чему осуществляется обработка поверхности по длине. Вследствие того, что тяговое устройство 13 через суммирующий механизм 6 связано с механизмом 8 возвратно-поступательного движения, каретка 9 с инструментом 5 получают дополнительное возвратно-поступательное движение O_4 , вследствие чего инструментом формируется винтовая поверхность с круговым профилем, требуемый шаг которой задается органом настройки 15.

Требуемая величина эксцентриситета обработанной поверхности обеспечивается механизмом-построителем 8. По рассмотренной схеме могут обрабатываться и каналовые поверхности с отличной от окружности формой поперечного сечения.

Рассмотренная кинематическая структура позволяет также реализовать функциональные связи между исполнительными органами станка, необходимые для обработки некруглых цилиндрических поверхностей с равномерно расположенными по окружности конгруэнтными выступами согласно рисунку 2. Связь между вращением шпинделя 3 и возвратно-поступательным движением каретки 9, участвующими в движении профилирования $\Phi_1(B_1O_2)$, осуществляется кинематической цепью, содержащей суммирующий механизм 6 и орган настройки 7 в виде гитары сменных зубчатых колес, которой производится настройка на число выступов. Другая функциональная связь между вращением шпинделя и перемещением продольного суппорта совместно с прямолинейными направляющими обеспечивает движение подачи $\Phi_3(P_3)$, настройка скорости и направления которого производится соответственно органами 10 и 11.

Выводы

1. Технологические возможности станка определяются функциональными связями в формообразующей системе, реализуемыми совместно его компоновкой и кинематической структурой.

2. Кинематические и геометрические характеристики функциональных связей, отражаемые в формализованном виде посредством структурных формул компоновки станка, кинематики формообразования и кинематических схем обработки, служат основой построения его обрабатывающей системы на этапе функционального проектирования.

3. Реализация функциональных связей при проектировании станочного оборудования с учетом кинематического и компоновочного факторов позволяет минимизировать количество блоков компоновки при сохранении технологических возможностей станка за счет оптимизации его кинематической структуры.

4. Реализация новых функциональных связей в формообразующей системе при модернизации станка позволяет, не изменяя компоновку и кинематическую структуру, расширить его технологические возможности по форме обрабатываемых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Синтез рациональных общих схем обработки при проектировании станков / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 89 – 96.
2. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 2 – 10.
3. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики) / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
4. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
5. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
6. Чарнко, Д.В. Основы выбора технологического процесса механической обработки / Д.В. Чарнко. – М.: Машгиз, 1963. – 320 с.
7. Данилов, В.А. Синтез внутренних связей кинематических групп при проектировании металлорежущих станков / В.А. Данилов // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2010. – Вып. 25. – С. 312 – 318.
8. Данилов, В.А. Модульная компоновочно-кинематическая схема станка как средство его проектирования / В.А. Данилов, В.А. Терентьев // Машиностроение. – Минск, 2002. – Вып. 18. – С. 294 – 300.
9. Данилов, В.А. Механическая обработка профильных поверхностей на универсальных станках / В.А. Данилов, М.В. Бажин, А.И. Костюченко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1996. – № 5. – С. 68 – 70.
10. Данилов, В.А. Разработка и реализация технологий формообразования круговых винтовых поверхностей резанием / В.А. Данилов, А.А. Чепурной, Ю.В. Ситько // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 147 – 153.
11. Люкшин, В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В.С. Люкшин. – М.: Машиностроение, 1968. – 372 с.

Поступила 17.06.2013

**REALIZATION OF FUNCTIONAL CONNECTIONS
IN SHAPE-GENERATING SYSTEMS OF MACHINE-TOOL EQUIPMENT**

V. DANILOV

The basic types of kinematic chains, which provide realization of functional connections in shape-generating systems of machine-tool equipment, description of their kinematic and geometric characteristics by means of structural formulae of arranging of a machine, kinematics of shape-generation and kinematic schemes of processing are considered. The main stages of realization of functional connections at development of shape-generating systems of new and modernized machines are defined, which take into account kinematic and composition factors, which allows to minimize the quantity of composition blocks at the same time saving the technological possibilities of a machine at the expense of optimization of its kinematic structure. On the example of relief lathe the possibility of increasing of universality of machine-tool equipment is shown by means of forming and realization of new functional connections in shape-generating environment.

УДК 621.9.04:621.833.06–529.001

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРИВОДОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

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

Рассмотрена структурная схема зубофрезерного станка с числовым программным управлением для обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями. Исполнительные органы (управляемые координаты) станка оснащены индивидуальными управляемыми электродвигателями. Предложена система синхронизации исполнительных органов станка на базе типовых интегральных схем. Блок-схема системы синхронизации выполнена на основе принципа равнозначности управляемых координат в обеих формообразующих группах, воспроизводящих соответственно профиль зуба и линию зуба по длине обрабатываемого колеса. Рассмотрена автоматическая двухсторонняя коррекция управляющего сигнала на каждой управляемой координате.

Введение. Конструктивной особенностью цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК) с наклонными зубьями является использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных цилиндрических колес. Отсюда следует, что при использовании делительного конуса толщина зуба вдоль его линии равномерно уменьшается от большего основания делительного конуса к его меньшему основанию. Эта конструктивная особенность ЦЗК с наклонными зубьями позволяет регулировать боковой зазор в зубчатых передачах посредством осевого смещения колес. В итоге обеспечиваются в пределах срока службы передачи минимально допустимые величины бокового зазора и циклической ошибки. Такие ЦЗК как с прямыми, так и с винтовыми (косыми) зубьями используются в передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

Постановка задачи. Колеса с наклонными зубьями обрабатывают, как правило, червячными фрезами и зуборезными долбяками соответственно на зубофрезерных и зубодолбежных станках, модернизированных на основе изменения их компоновки для нарезания рассматриваемого вида ЦЗК. Изменение компоновки базовой модели зубофрезерного станка на этапе конструирования заключается в установке направляющих суппорта фрезы под углом к оси делительного стола или посредством установки продольного стола, несущего делительный стол, под углом, равным углу наклона зубьев по делительному конусу ЦЗК. Варианты модернизации на основе принципа изменения компоновки снижают коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубофрезерных станков, так как их переналадка на иной угол наклона зубьев или наладка на обработку традиционных ЦЗК проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения червячной фрезы по делительному конусу при обработке как прямозубых, так и косозубых ЦЗК с наклонными зубьями [1; 2].

В зубофрезерных станках с механическими связями формообразующие кинематические группы по условиям компоновки содержат механические передачи, включая органы настройки на параметры исполнительных движений. Основными органами настройки, обеспечивающими функциональную связь между исполнительными органами при заданных передаточных отношениях инструмент – заготовка, являются гитары сменных зубчатых колес, расположенные во внутренних связях. Например, кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых (косозубых) ЦЗК с наклонными зубьями [3] содержит во внутренней связи двухэлементарной группы воспроизведения профиля зубьев колеса одну гитару сменных зубчатых колес, а во внутренней связи трехэлементарной группы воспроизведения линии зуба по длине – две гитары сменных зубчатых колес. Механические передачи этих связей являются основным источником погрешностей зубчатых поверхностей. Поэтому на зубофрезерных станках с механическими связями обработка ЦЗК, более точных, чем 6-й квалитет точности, весьма проблематична. Это обстоятельство является причиной замены механических связей системами отслеживающей синхронизации на основе управляемых электроприводов и типовых интегральных схем [4].

Разработка структурной схемы. На рисунке 1 приведена структурная схема зубофрезерного станка для обработки ЦЗК с наклонными зубьями. Общая компоновка базовых элементов выполнена аналогично компоновке, принятой для универсальных (базовых) зубофрезерных станков. Управляемые высокомоментные электродвигатели постоянного тока M_1, M_2, M_3, M_4 кинематически связаны соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3 делительного стола, несущего заготовку 4 обрабатываемого ЦЗК, тяговыми валами TB_1 и TB_2 , выполненными в виде передач винт-гайка. Гайка TB_1 жесткой связью соединена с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2, а гайка TB_2 – с про-

долным столом 6, несущим шпиндель 3 делительного стола с заготовкой 4. Шпиндель 1 червячной фрезы, шпиндель 3 делительного стола, суппорт 5 и продольный стол 6 являются исполнительными органами станка. Для обеспечения связи механики станка с системой синхронизации на шпинделях 1 и 3, винтах тяговых валов TB_1 и TB_2 установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 7, 8, 9, 10. Эти преобразователи предназначены для преобразования круговых частот вращения в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему синхронизации приводов исполнительных органов.

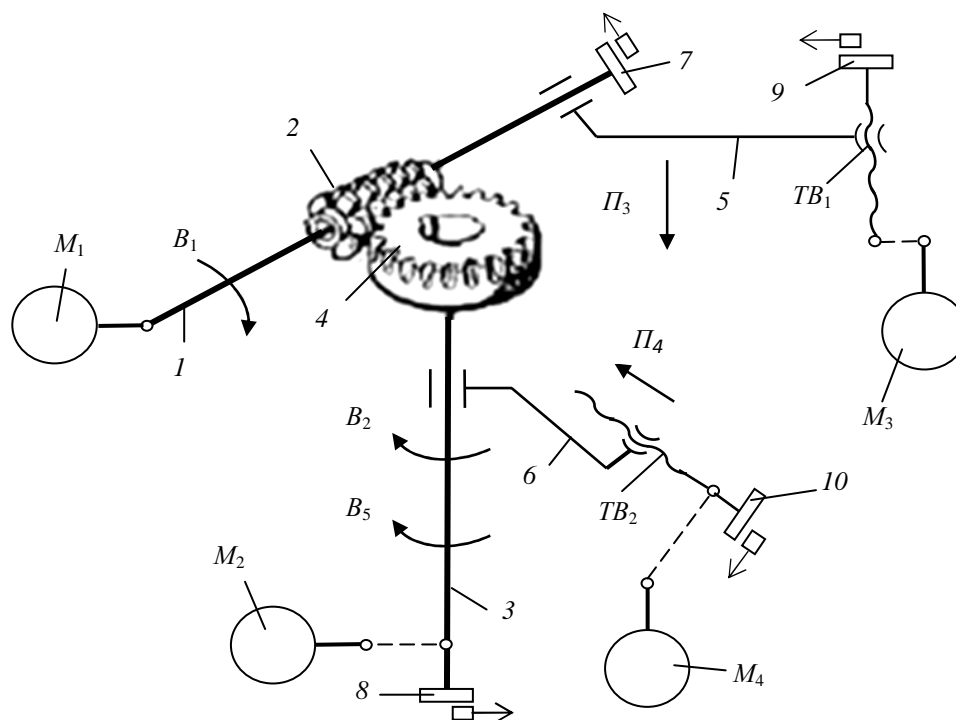


Рис. 1. Структурная схема приводов зубофрезерного станка для обработки ЦЗК с наклонными зубьями

Приведенная структурная схема включает следующие частные структуры для обработки ЦЗК с наклонными зубьями:

- структуру для нарезания винтовых (косозубых) ЦЗК с наклонными зубьями, содержащую двухэлементарную группу скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$ и трехэлементарную группу подачи $\Phi_s(P_3 P_4 B_5)$;
- структуру для нарезания прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями, содержащую двухэлементарную группу скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$ и двухэлементарную группу подачи $\Phi_s(P_3 P_4)$.

Рассмотренная структурная схема включает также частные структуры для обработки традиционных ЦЗК и червячных колес:

- структуру для нарезания прямозубых ЦЗК, содержащую двухэлементарную группу скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$ и элементарную группу подачи $\Phi_s(P_3)$;
- структуру для нарезания винтовых (косозубых) ЦЗК, содержащую двухэлементарную группу скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$ и двухэлементарную группу подачи $\Phi_s(P_3 B_5)$;
- структуру для нарезания червячных колес, содержащую двухэлементарную группу скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$ и элементарную группу радиального врезания $Vp(P_4)$.

Выбор конкретной частной структуры осуществляется посредством управляющего устройства, например, программируемого контроллера, обеспечивающего отключение неиспользуемых исполнительных органов и соответствующие коммутации в системе синхронизации.

Разработка системы синхронизации исполнительных органов. Система синхронизации выполнена по схеме равнозначных координат и автоматической двухсторонней коррекцией (адаптацией) управляющих сигналов по погрешностям механики исполнительных органов [5; 6]. Эта система содержит две подсистемы с общим задатчиком (эталонным генератором), вырабатывающим задающий сигнал, частота которого превышает частоту импульсного сигнала – аналога частоты вращения шпинделя червячной фрезы. Первая подсистема осуществляет синхронизацию приводов кинематической группы скорости резания, а вторая подсистема – синхронизацию приводов кинематической группы подачи.

На рисунке 2 приведена блок-схема подсистемы синхронизации приводов исполнительных органов группы скорости резания $\Phi_v(B_1 B_2)$.

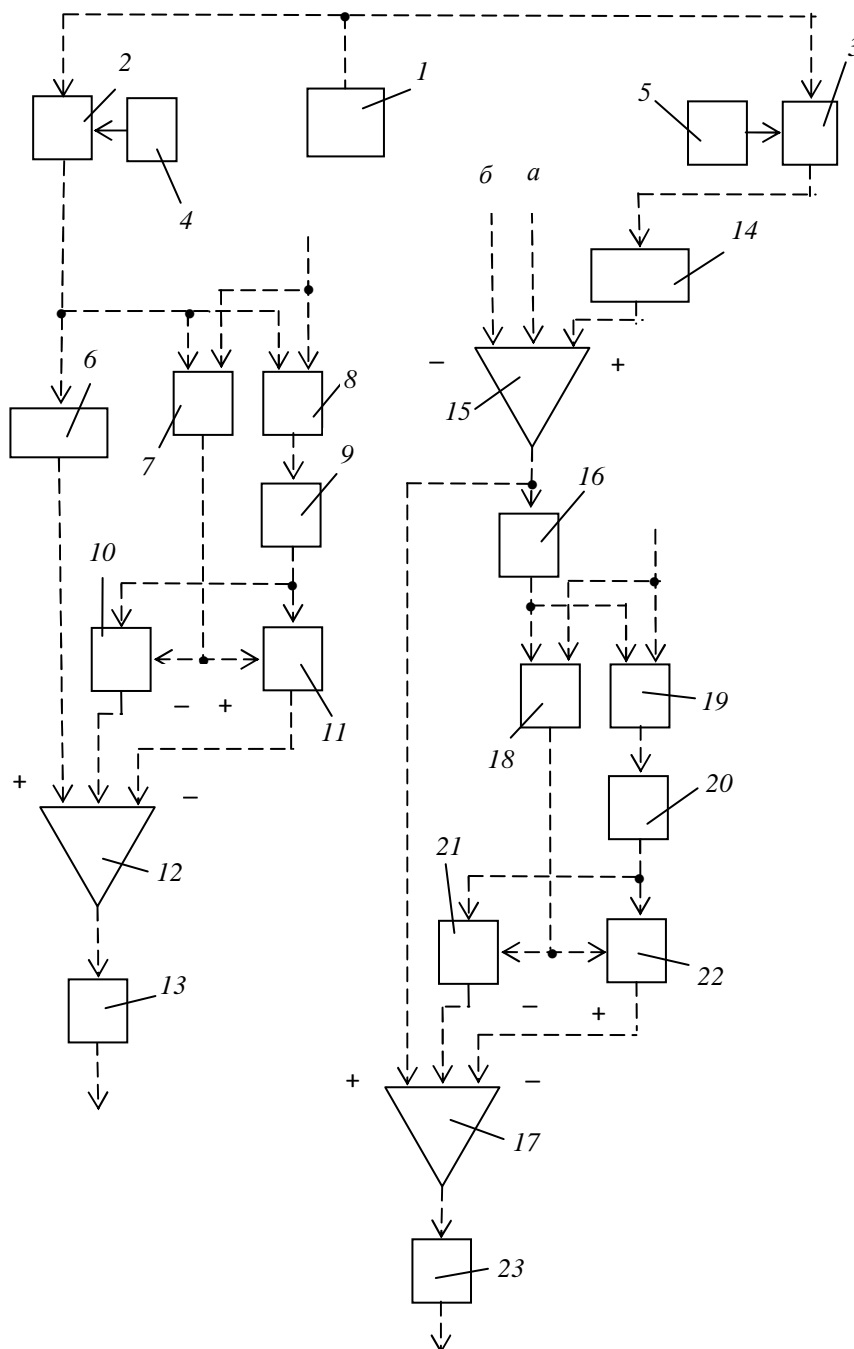


Рис. 2. Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы скорости резания

Эталонный генератор 1 соединен с входами счетчиков 2, 3, к которым присоединены блоки установки коэффициентов деления соответственно 4, 5. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при наладке станка. Счетчики и соответствующие блоки установки коэффициента деления образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов управления соответствующих исполнительных органов (управляемых координат).

Выход счетчика 2 соединен с входом блока 6 круговой частоты шпинделя фрезы в движении B_1 и первыми входами знакового 7 и фазового 8 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 7, установленным на шпинделе фрезы 2 (см. рис. 1).

Выход фазового дискриминатора 8 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 10, управляемого отрица-

ным потенциалом, и аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 10 и 11 соединены с выходом знакового дискриминатора 7. Выход блока 6 круговой частоты шпинделя фрезы соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 12, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 12 через усилитель мощности 13 соединен с управляемым электродвигателем M_1 привода вращения шпинделя фрезы (см. рис. 1).

Выход счетчика 4 соединен с входом блока 14 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_2 , выход которого соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 15. Его выход соединен с входом аналого-импульсного преобразователя 16 и с первым входом сложения параллельного сумматора 17. Выход аналого-импульсного преобразователя 16 соединен с первыми входами знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 8, установленным на шпинделе заготовки (см. рис. 1). Выход фазового дискриминатора 19 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 20, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 21 и 22 соединены с выходом знакового дискриминатора 18. Выходы ключей 21 и 22 соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 17. Выход параллельного сумматора 17 через усилитель мощности 23 соединен с управляемым электродвигателем M_2 привода вращения заготовки (см. рис. 1).

На рисунке 3 приведена блок-схема подсистемы синхронизации приводов исполнительных органов группы подачи $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_3)$.

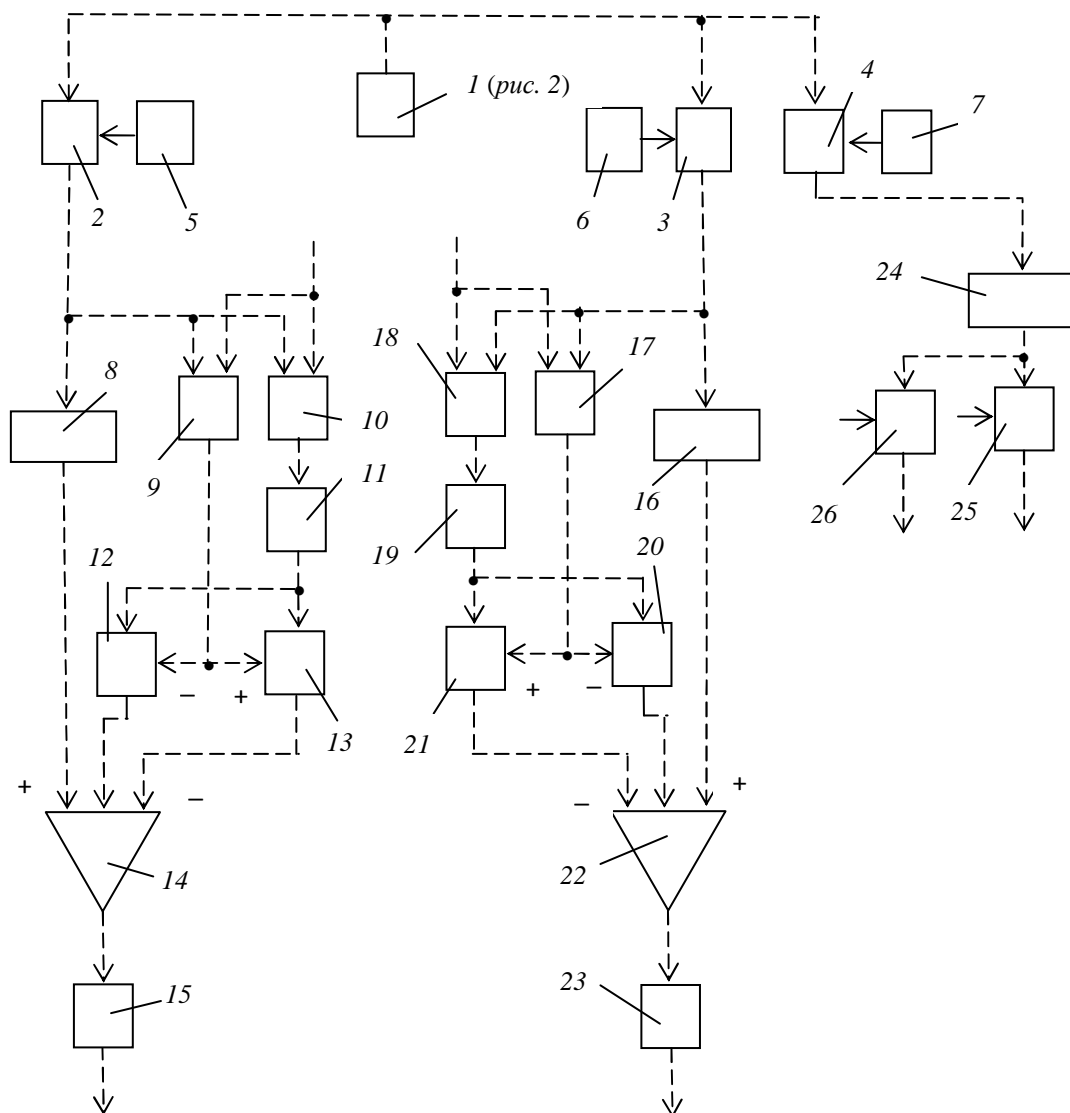


Рис. 3. Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы подачи

Счетчики 2, 3, 4 с присоединенными к ним блоками установки коэффициентов деления соответственно 5, 6, 7 образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов. Входы счетчиков 2, 3, 4 соединены с выходом эталонного генератора 1. Выход счетчика 2 соединен с входом блока 5 круговой частоты винта тягового вала TB_1 , преобразуемой этим валом в продольную подачу P_3 суппорта 5, и первыми входами знакового 6 и фазового 7 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 9, установленным на винте тягового вала TB_1 (см. рис. 1). Выход фазового дискриминатора 7 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 8, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 9, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 10, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 9 и 10 соединены с выходом знакового дискриминатора 6. Выход блока 5 круговой частоты винта тягового вала TB_1 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 11, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 9, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 10, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 11 через усилитель мощности 12 соединен с управляемым электродвигателем M_3 привода продольной подачи суппорта фрезы (см. рис. 1).

Выход счетчика 3 соединен с входом блока 16 круговой частоты винта тягового вала TB_2 , преобразуемой этим валом в подачу P_4 продольного стола, и первыми входами знакового 17 и фазового 18 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 10, установленным на винте тягового вала TB_2 (см. рис. 1).

Выход фазового дискриминатора 18 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 19, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 20, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 21, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 20 и 21 соединены с выходом знакового дискриминатора 17. Выход блока 16 круговой частоты винта тягового вала TB_2 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 22, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 20, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 21, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 22 через усилитель мощности 23 соединен с управляемым электродвигателем M_4 привода подачи продольного стола (см. рис. 1).

Выход счетчика 4 соединен с входом блока 24 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_5 , у которого выход соединен с входами ключей 25 и 26, управляемых положительным потенциалом. Выходы этих ключей соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 15 (см. рис. 2).

Блоки 6, 14 (см. рис. 2) и 8, 16, 24 (см. рис. 3) круговых частот соответственно шпинделя фрезы (движение B_1), шпинделя делительного стола заготовки (движение B_2), винта тягового вала TB_1 , винта тягового вала TB_2 , шпинделя делительного стола заготовки (движение B_5) выполнены одинаково по схеме «частота – напряжение». В этих блоках эталонные импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Круговые частоты винтов тяговых валов TB_1 и TB_2 в этих механизмах преобразуются соответственно в движение P_3 продольной подачи суппорта фрезы и в движение P_4 радиальной подачи продольного стола.

Согласно нормативам резания при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания задается по круговой частоте фрезы (движение B_1), а подача – по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение P_3). При нарезании червячных колес по нормативам резания задается также подача радиального врезания (движение P_4). При наладке станка блоком 4 установки коэффициента деления (см. рис. 2) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующая напряжению постоянного тока на электродвигателе M_1 , при котором шпиндель 1 фрезы 2 в движении B_1 вращается со скоростью, соответствующей заданной скорости резания. Аналогично блоком 5 установки коэффициента деления (см. рис. 3) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующая напряжению постоянного тока на электродвигателе M_3 , при котором суппорт 5 в движении P_3 движется со скоростью, соответствующей заданной подаче. При нарезании червячных колес блоком 6 установки коэффициента деления (см. рис. 3) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика 3, соответствующая напряжению постоянного тока на электродвигателе M_4 , при котором продольный стол 6 в движении P_4 движется со скоростью, соответствующей заданной подаче врезания.

Рассмотренные делители частоты (счетчик – блок установки передаточного отношения) выполняют функцию органов настройки параметра «скорость» для соответствующих кинематических групп. Остальные делители частоты рассматриваемой системы синхронизации являются органами настройки параметра «траектория». Коэффициенты деления для них выводятся на основе расчетных перемещений для исполнительных органов станочного зацепления сложных кинематических групп.

Расчетные перемещения для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката $\Phi_i(B_1B_2)$:

$$\text{один оборот шпинделя фрезы (} B_1 \text{)} \rightarrow \kappa / z \text{ оборот делительного стола заготовки (} B_2 \text{),}$$

где κ – число заходов червячной фрезы; z – число нарезаемых зубьев.

Уравнение кинематической связи станочного зацепления:

$$\kappa / z = 1 \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений механических передач кинематической связи; n_1 – круговая частота электродвигателя M_1 , соответствующая заданной скорости резания, мин^{-1} ; n_2 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката, мин^{-1} .

В уравнении кинематической связи отношение круговых частот заменим отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$\kappa / z = 1 \cdot c_1 \cdot i_1 / i_2.$$

По этому выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на блоке 5 делителя частоты 3:

$$i_2 = (c_1 z / \kappa) i_1,$$

где i_1 – коэффициент деления, установленный на блоке 4 счетчика 2, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 (скорости резания); i_2 – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 5 счетчика 3 для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы (B_1) и шпинделя заготовки (B_2).

Трехэлементарная группа подачи $\Phi_s(P_3P_4B_5)$ воспроизводит два станочных зацепления. Первое зацепление обеспечивает перемещение траектории исполнительного движения подачи под углом к делительному цилиндру, равному углу наклона зубьев нарезаемого колеса. Расчетные перемещения для данного зацепления [2]:

$$S_n \text{ фрезы в движении } P_3 \rightarrow S_p \text{ продольного стола в движении } P_4,$$

где S_n – продольная подача; $S_p = S_n \operatorname{tg} \varphi$; φ – угол наклона зубьев ЦЗК с наклонными зубьями.

Уравнение кинематической связи станочного зацепления:

$$S_p = S_n \cdot c_2,$$

где c_2 – произведение передаточных отношений механических передач кинематической связи.

В уравнении кинематической связи отношение подач заменим отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$i_4 = i_3 \cdot c_2,$$

где i_3 – коэффициент деления, установленный на блоке 5 счетчика 2, соответствующий заданной продольной подаче; i_4 – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 6 счетчика 3 для обеспечения функциональной связи суппорта фрезы (P_3) и продольного стола (P_4).

Второе станочное зацепление группы подачи обеспечивает воспроизведение винтовой линии зуба по делительному конусу. Расчетные перемещения для данного зацепления:

$$T \text{ мм перемещения суппорта фрезы в движении } P_3 \rightarrow \text{один оборот делительного стола в движении } B_5,$$

где T – шаг винтовой линии зуба нарезаемого колеса с наклонными зубьями.

Уравнение кинематической связи станочного зацепления имеет вид:

$$I = (T/P) \cdot (n_3/n_5) \cdot c_3,$$

где P – шаг тягового вала TB_1 ; c_3 – произведения постоянных механических передач кинематической связи; n_3 – круговая частота электродвигателя M_3 , соответствующая заданной продольной подаче суппорта фрезы; n_5 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

В уравнении кинематической связи отношение круговых частот заменим отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = (T/P) \cdot (i_3/i_5) \cdot c_3.$$

По полученному выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на блоке 7 счетчика 4:

$$I_5 = (c_2 T/P) i_3,$$

где i_3 – коэффициент деления, установленный на блоке 5 счетчика 2, соответствующий заданной продольной подаче; i_5 – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 7 счетчика 4 для обеспечения функциональной связи суппорта (P_3) и делительного стола заготовки (B_5).

Делительный стол заготовки является исполнительным органом обеих кинематических групп. При нарезании винтовых (косозубых) ЦЗК результирующая круговая частота делительного стола представляет

собой математическую сумму $B_2 \pm B_5$ двух движений B_2 и B_5 , образующих совместно соответственно с движениями B_1 , P_3 , P_4 движение обката (B_1B_2), воспроизводящее профиль зуба, и винтовое движение подачи ($P_3P_4B_5$), воспроизводящее линию зуба. Выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий нарезаемого колеса и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые, знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименны, например, одна – правая, а другая – левая. Необходимый знак устанавливается при наладке станка подачей управляющего сигнала на потенциальный вход или ключа 25, или ключа 26 (см. рис. 3).

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора 1 задающий эталонный высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики системы синхронизации, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 2 (см. рис. 2) поступает на вход блока 6 круговой частоты шпинделя фрезы, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода блока 6 сигнал через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 12 и усилитель мощности 13 поступает на управляемый электродвигатель M_1 , который сообщает вращательное движение B_1 шпинделю 1 фрезы с круговой частотой, пропорциональной частоте эталонного сигнала на выходе счетчика частоты 2. Синхронно с выхода счетчика 3 импульсный сигнал поступает на вход блока 14 круговой подачи делительного стола заготовки в движении B_2 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 14 поступает на первый вход сложения параллельного сумматора 15.

Синхронно с выхода счетчика 4 (см. рис. 3) импульсный сигнал поступает на вход блока 24 круговой подачи делительного стола заготовки в движении B_5 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 24 поступает в зависимости от знака математического сложения движений B_2 и B_5 на одном исполнительном органе или через ключ 25 на второй вход сложения параллельного сумматора 15 (см. рис. 2), или через ключ 26 на вход вычитания этого параллельного сумматора. С выхода параллельного сумматора 15 результирующий сигнал через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 17 и усилитель мощности 23 поступает на управляемый электродвигатель M_2 (см. рис. 1), который сообщает вращательное движение $B_2 \pm B_5$ круговой подачи делительному столу заготовки с круговой частотой, согласованной с движениями B_1 и P_3 червячной фрезы. Синхронно с выхода счетчика 2 (см. рис. 3) импульсный сигнал поступает на вход блока 8 продольной подачи суппорта фрезы в движении P_3 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 8 через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 14 и усилитель мощности 15 сообщается управляемому электродвигателю M_3 , который посредством тягового вала TB_1 сообщает движение P_3 суппорту фрезы, пропорциональное частоте сигнала на выходе счетчика частоты 5. Синхронно с выхода счетчика 6 импульсный сигнал поступает на вход блока 16 радиальной подачи продольного стола в движении P_4 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 16 через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 22 и усилитель мощности 23 поступает на управляемый электродвигатель M_4 , который посредством тягового вала TB_2 сообщает движение P_3 продольному столу, пропорциональное частоте сигнала на выходе счетчика 5.

В итоге описанного прохождения эталонного сигнала от общего задатчика – эталонного генератора 1 – к исполнительным органам – шпинделю червячной фрезы, делительному столу заготовки, суппорту червячной фрезы, продольному столу, несущему делительный стол, происходит воспроизведение профиля и винтовой линии зуба ЦЗК на делительном конусе.

Одновременно обеспечивается устранение девиации механики исполнительных органов посредством двухсторонней коррекции сигналов управления электродвигателями, действующих на выходах параллельных сумматоров 12, 17 (см. рис. 2) и 14, 22 (см. рис. 3).

На первых входах фазового 8 и знакового 7 дискриминаторов постоянно действует импульсный сигнал с выхода счетчика 2. На вторые входы этих дискриминаторов поступает вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 7 (см. рис. 2) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной круговой частоты шпинделя фрезы. В обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении шпинделя фрезы. В результате на выходе фазового дискриминатора 8 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 19, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 7 образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя фрезы от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 10 и 11 и открывает один из них. При открывании аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 12, а при открывании аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вы-

читания параллельного сумматора 12. В сумматоре в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция (регулирование) относительно заданного номинального значения.

Результирующий аналоговый сигнал с выхода параллельного сумматора 15 поступает на вход аналого-импульсного преобразователя 16, где он преобразуется в импульсный сигнал, пропорциональный напряжению входного сигнала. С выхода этого преобразователя импульсный сигнал поступает на первые входы знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов. На вторые входы этих дискриминаторов поступает, вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 8 (см. рис. 1) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной суммарной круговой частоты делительного стола заготовки. В обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении делительного стола заготовки. В результате на выходе фазового дискриминатора 19 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 20 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 2, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 18 образуется отрицательный потенциал при отставании делительного стола заготовки от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 21 и 22 и открывает один из них. При открывании аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 17, а при открывании аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 17. В параллельном сумматоре 17 в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно заданного номинального значения.

На первых входах фазового 10 и знакового 9 дискриминаторов постоянно действует импульсный сигнал с выхода счетчика 2 (см. рис. 3). На вторые входы этих дискриминаторов поступает вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 9 (см. рис. 1) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной продольной подачи суппорта червячной фрезы. В обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении суппорта. В результате на выходе фазового дискриминатора 10 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 11 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 12, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 13, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 9 образуется отрицательный потенциал при отставании суппорта от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 12 и 13 и открывает один из них. При открывании аналогового ключа 12, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 14, а при открывании аналогового ключа 13, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 14. В этом параллельном сумматоре в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно заданного номинального значения.

Аналогично происходит коррекция сигнала, управляющего приводом продольного стола, несущего делительный стол. На первых входах фазового 18 и знакового 17 дискриминаторов постоянно действует импульсный сигнал с выхода счетчика 3 (см. рис. 3). На вторые входы этих дискриминаторов поступает вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 10 (см. рис. 1) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной подачи продольного стола. В обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении этого стола. В результате на выходе фазового дискриминатора 18 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 19 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 20, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 21, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 17 образуется отрицательный потенциал при отставании делительного стола от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 20 и 21 и открывает один из них. При открывании аналогового ключа 20, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 22, а при открывании аналогового ключа 21, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 22. В этом сумматоре в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно заданного номинального значения.

При обработке различных модификаций зубчатых колес группа $\Phi_1(B_1B_2)$, воспроизводящая профиль зубьев, остается неизменной, а группа $\Phi_2(P_3 P_4 B_5)$, воспроизводящая линию зуба, изменяется посредством управляющего устройства. При обработке прямозубого ЦЗК с линией зуба на делительном

конусе группа Φ_s коммутируется к виду $\Phi_s(P_3 P_4)$. Для этого отключается счетчик 4 (см. рис. 3) и аналого-импульсный преобразователь 16 (см. рис. 2), а первые входы знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов подключаются непосредственно к выходу счетчика 3. При обработке прямозубого ЦЗК с линией зуба на делительном цилиндре группа Φ_s коммутируется к виду $\Phi_s(P_3)$. Для этого отключается счетчик 3 (см. рис. 3), задающий управляющий сигнал электродвигателю продольного стола. При обработке винтового (косо-зубого) ЦЗК с линией зуба на делительном цилиндре группа Φ_s коммутируется к виду $\Phi_s(P_3 B_5)$. Для этого отключается счетчик 3 (см. рис. 3), задающий управляющий сигнал электродвигателю продольного стола. При обработке червячного колеса формообразующая группа Φ_s преобразуется в элементарную группу врезания $Bp(P_3)$. Для этого отключается счетчик 2 (см. рис. 3), задающий управляющий сигнал электродвигателю продольной подачи суппорта фрезы.

Выводы

1. Расширение универсальности зубофрезерных станков с механическими связями за счет обработки ЦЗК с наклонными зубьями (с линией зубьев на делительном конусе) усложняет их кинематическую структуру. В частности, простая формообразующая кинематическая группа подачи при обработке прямозубого ЦЗК с наклонными зубьями преобразуется в сложную двухэлементарную, а при обработке винтового (косо-зубого) ЦЗК с наклонными зубьями – в сложную трехэлементарную кинематическую группу с дополнительным органом настройки на траекторию движения подачи (четырёхколесной гитарой сменных зубчатых колес).

2. Увеличение механических связей в кинематической структуре зубофрезерных станков с механическими связями при прочих равных условиях приводит к снижению точности обработки и повышению уровня шума станка при работе. Увеличивается также время наладки станков, что нежелательно при обработке небольших партий зубчатых колес.

3. Замена механических связей, включающих органы настройки параметров исполнительных движений, между исполнительными органами зубофрезерного станка для обработки ЦЗК как с линией зуба на делительном конусе, так и с линией зуба на делительном цилиндре системой синхронизации на основе типовых интегральных схем между их управляемыми электродвигателями создает предпосылки для повышения точности обработки, оптимизации режимов резания и снижения уровня шума при работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации: пат. 6134 Респ. Беларусь, В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубл. 29.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
2. Голембиевский, А.И. Обработка цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 102 – 109.
3. Голембиевский, А.И. Типовая кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 4 – 8.
4. Ратмиров, В.А. Программное управление зубообрабатывающими станками / В.А. Ратмиров, П.М. Рашкович. – М.: НИИмаш, 1983. – 47 с.
5. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка: пат. 8621 Респ. Беларусь, В 23Q 15/00, В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубл. 26.07.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр. інтэлектуал. уласнасці. – 2006.
6. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка: пат. 16976 Респ. Беларусь, В23Q 15/00, В23F 9/10 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубл. 26.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр. інтэлектуал. уласнасці. – 2012.

Поступила 11.06.2013

SYNCHRONIZATION OF DRIVES OF EXECUTIVE GEAR MILLING MACHINE FOR MANUFACTURING GEAR WITH SLANTED TEETH

A. GOLEMBIEVSKY

The structural scheme of a gear milling machine with CNC for machining cylindrical gears with inclined teeth is considered. Executive bodies (controlled axes) of the machine are equipped with individually controlled motors. A system for synchronizing of executive machine-based model of integrated circuits is provided. A block scheme of the synchronization is made on the basis of the principle of equivalence in both coordinates forming groups, respectively reproducing tooth profile and a line along the length of the treated tooth wheel. An automatic two-sided correction control signal on each managed coordinate is considered.

УДК 631.3.02.004.67

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ,
канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК
(Полоцкий государственный университет)*

Исследовано техническое состояние корпусных деталей и выявлены доли деталей с пробоинами, трещинами и короблением элементов, изменяющими их размеры, форму и относительное расположение. Обоснованы состав и последовательность технологических операций процесса восстановления корпусной детали, обеспечивающего наиболее полное использование ее остаточной долговечности. Предложены новый способ устранения трещин и новая последовательность базирования ремонтной заготовки при ее обработке резанием. Рекомендовано ограничить применение источников тепла при восстановлении деталей.

Введение. К корпусным деталям относятся блоки и головки цилиндров двигателей, картеры коробов передач, ведущих мостов и сцеплений, крышки распределительных шестерен, корпуса масляных, топливных и водяных насосов и многие другие. Они изготовлены из отливок из серого или ковкого чугуна (СЧ18, СЧ 21, СЧ 24, КЧ30, КЧ33 и др.), алюминиевого (АЛ4, АЛ9 и др.) или цинкового (ЦАМ) сплавов. В качестве материала отливок чаще применяют серый чугун и алюминиевые сплавы. Корпусная деталь ориентирует движущиеся детали агрегата при его работе и содержит запас смазочного материала.

Исправное состояние и нормативный ресурс корпусных деталей при их восстановлении обеспечиваются путем доведения до установленных технической документацией значений геометрических параметров и эксплуатационных свойств, изменившихся во время предыдущего длительного использования по назначению. Корпусные детали относятся к ресурсным деталям, качество восстановления которых определяет послеремонтную надежность всего агрегата. Однако цена корпусных деталей в виде запасных частей превышает стоимость капитального ремонта отдельных агрегатов, что подчеркивает актуальность их восстановления.

Цель исследования заключается в обосновании содержания и структуры процесса, обеспечивающего достижение нормативного качества восстановления корпусных деталей при меньших затратах труда и материалов.

Техническое состояние корпусных деталей. Наиболее сложные детали из класса корпусных – это блоки цилиндров двигателей. Из нескольких десятков повреждений прочностного и точностного характера основными являются: трещины и пробоины в стенках, обломы фланцев, коробление стыков, разрушение резьбы в отверстиях, деформация или износ отверстий под подшипники, гильзы и стаканы.

Пробоины – результат ударов деталей о стенки в момент разрушения. Они наблюдаются у 2 % блоков цилиндров двигателей Д-240, 4 % – ЯМЗ-238 и ЯМЗ-238НБ. Пробоины стенок расположены, как правило, в нижней части картера в плоскости качания шатуна. Сравнительно небольшие пробоины имеют размеры от 50×50 до 100×100 мм, пробоины больших размеров распространяются от одной поперечной перегородки до другой или с выходом на обработанную плоскость (например, на поверхность прилегания масляного картера). Блоки цилиндров с последними повреждениями и с пробоинами, захватывающими масляные каналы, являются неремонтнопригодными.

Самым распространенным повреждением прочностного характера являются трещины их элементов (15...27 % от всех повреждений). Детали с трещинами, проходящими через приливы с точными отверстиями, подлежат выбраковке.

Наиболее часто трещины возникают в стенках водяных рубашек (11...44 %), перемычках цилиндров (3...16 %), плоскости под головку цилиндров (до 14 %) и бобышках под шпильки крепления головок цилиндров (до 11 %). Значительно реже (0,5...9,0 %) они возникают в коренных опорах (в том числе в их крышках), бобышках под гильзы (до 7 %), поперечных перегородках (0,3...4,0 %), бобышках под втулки распределительного вала, плоскости под масляный картер и в стенках масляной магистрали (до 4 %). Трещины от разовых или циклических нагрузок (сквозные и несквозные) имеют длину от 2 до 500 мм (рис. 1) при числе их в одном элементе детали 1...3 и более. Максимальное количество таких повреждений наблюдается в возрасте блоков цилиндров 5...7 лет.

Трещины в перемычках между цилиндрами часто наблюдаются у двигателей Д-240 и их модификаций. Трещины зарождаются снизу, в единичных случаях – сверху. Экспериментальные исследования ГосНИТИ (Москва) объясняют этот факт значительными рабочими напряжениями в перемычках, которые составляют 27...35 МПа [1]. Возраст деталей, у которых образовались трещины, – более 7 лет. Трещины рас-

пространяются только до буртиков под гильзы, поэтому подлежат устранению. Трещины в стенках масляной магистрали образуются в результате разрушения поршней или шатунов и встречаются редко.

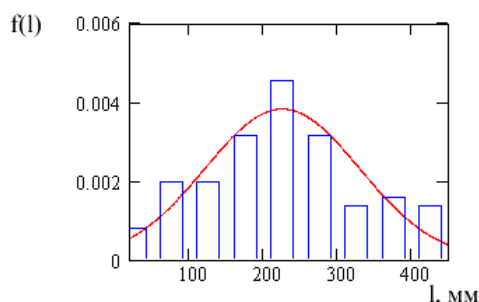


Рис. 1. Полигон и плотность вероятности распределения $f(l)$ блоков цилиндров двигателей Д-240 по длине l трещин в стенках водяной рубашки

Самые распространенные повреждения блоков цилиндров точностного характера – отклонение диаметра коренных опор от номинального значения (рис. 2) и их несоосность, главным образом за счет деформирования крышек, а также отклонение диаметра отверстий под гильзы от номинального значения (рис. 3). Наблюдаются отклонения диаметра коренных опор от номинального значения и несоосности до 100 мкм, диаметра отверстий под гильзы цилиндров из-за овальности – до 200 мкм. Неплоскостность поверхности под головку цилиндров составляет 60...200 мкм (в 15...28 % случаев этот показатель больше допустимого). В 60 % случаев размер отверстий под толкатели находится в поле допуска на их восстановление. Доля годных блоков цилиндров двигателей Д-240 по диаметру коренных опор составляет 12,0 %, а по отверстиям под гильзы цилиндров – 83,0 % (рис. 3).

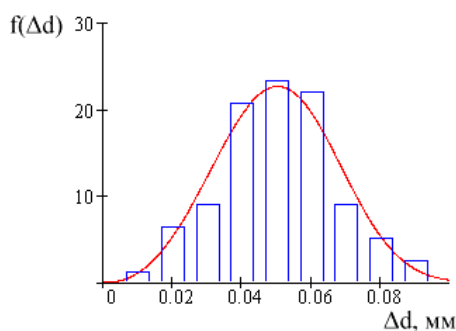


Рис. 2. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ блоков цилиндров двигателей Д-240 по отклонению Δd диаметра коренных опор от номинального значения

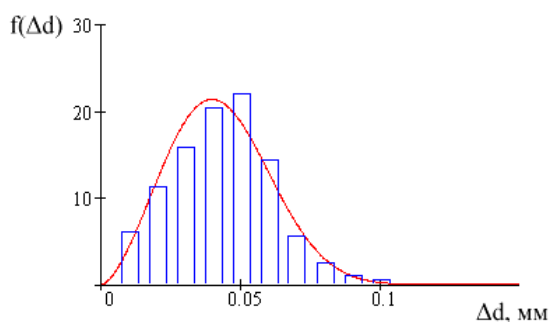


Рис. 3. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ блоков цилиндров двигателей Д-240 по отклонению (увеличению) Δd диаметра нижних отверстий под гильзы от номинального значения

Большой объем работ связан с восстановлением резьбовых отверстий, до 35 % которых бывают поврежденными. Наиболее интенсивно изнашиваются резьбовые отверстия в деталях из алюминиевых сплавов (30...35 %) и чугуна (10...12 %). В меньшей степени изнашиваются резьбовые отверстия в стальных деталях (3...5 %). Чаще изношены резьбы размером М8, М10, М12, М14 и М16. Только 2...7 % блоков цилиндров не требуют восстановления.

Восстанавливаемые элементы, параметры и характеристики. В корпусных деталях восстанавливают целостность фланцев, прочность и герметичность стенок, а также геометрическую точность элементов. Большие проблемы при восстановлении корпусных деталей вызывает обеспечение параметров расположения. При восстановлении обрабатываются не все поверхности, ранее обработанные при изготовлении. В отличие от требований к изготовленной детали, у восстановленной детали должны быть обеспечены нормативные значения параметров расположения поверхностей, обработанных при изготовлении, а при восстановлении остающихся не обработанными, и поверхностей, обрабатываемых при восстановлении.

Типовой технологический процесс восстановления корпусной детали включает такие операции, как: *предварительная обработка* резанием поверхностей под подшипники, мест обломов фланцев и приливов, разделка трещин; *изготовление дополнительных ремонтных деталей (ДРД)*; *сварочные* (в том числе связанные с закреплением ДРД) и *наплавочные работы*; *отжиг* для снятия внутренних напряжений от сварки; *напыление* поверхностей; *механическая обработка* сварных швов; *нанесение полимерных покрытий*; *установка ДРД*, закрепляемых силами упругости, клеем и штифтами; *черновая обработка резанием* стыков и отверстий; *нарезание резьбы* номинального и ремонтного размеров и установка спиральных резьбовых вставок; *чистовая обработка резанием* поверхностей; *очистка детали* от технологических загрязнений; *контроль* восстановления [2].

Обработка резанием в начале технологического процесса восстановления детали служит для удаления поврежденных элементов, придания восстанавливаемым поверхностям правильной геометрической формы, разделки трещин, выполнения упоров и стыков под установку ДРД.

Трещины разделяют с помощью шлифовальных машинок типа ИП 2002. В качестве инструмента используют армированный абразивный круг. В концах трещин высверливают отверстия диаметром 3 мм. Трещины в чугунных стенках заваривают проволокой ПАНЧ-11 или ПАНЧ-12, или штучными электродами ЦЧ-3А участками шва 20...25 мм с его проковкой. Сварочные работы на деталях из алюминиевого сплава выполняют аргонодуговой сваркой.

Сварочные и наплавочные работы связаны с вложением тепла в материал детали, вызывают большие внутренние напряжения и сопутствующие деформации. Деформации чугунных заготовок могут быть уменьшены их нагревом перед сваркой, выдержкой при температуре 600 °С во время сварки и охлаждением вместе с печью. На место обломанных приливов корпусных деталей, выполненных из алюминиевого сплава, приваривают ДРД. Корпусная деталь из алюминиевого сплава, изготовленная кокильным литьем, после сварки должна пройти термическую обработку при температуре 180 °С в течение 10 часов.

В следующей части технологического процесса наносят покрытия напылением. Трещины и пробоины в несилевых стенках детали герметизируют накладками с помощью эпоксидных компаундов на основе смол ЭД16 или ЭД20.

Варианты создания припусков на восстанавливаемых поверхностях детали следующие (рис. 4): установка с закреплением ДРД (*способ 1*); наплавка (*способ 2*); газотермическое напыление (*способ 3*); приварка металлического слоя (*способ 4*); использование поверхностного слоя металла на поверхностях коренных опор (*способ 5*).

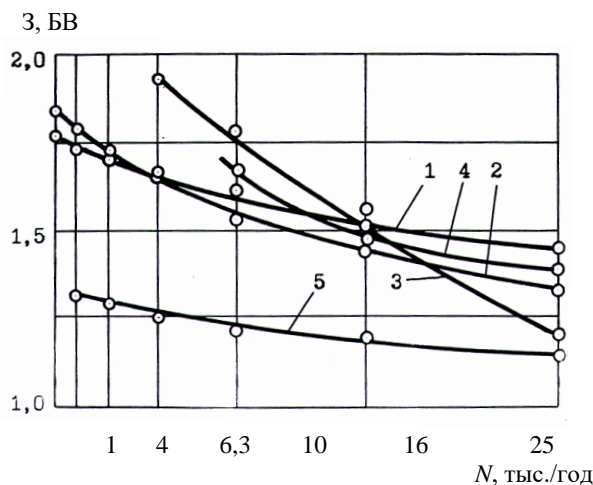


Рис. 4. Зависимости затрат Z в долях базовой величины (БВ) от объемов восстановления блоков цилиндров N :

- 1 – установка ДРД; 2 – наплавка; 3 – газотермическое напыление; 4 – припекание металлического слоя;
5 – использование поверхностного слоя металла на поверхности коренных опор

Наименьшие затраты на получение ремонтной заготовки дает способ 5. Здесь отсутствует расход материалов, а затраты определяются лишь механической обработкой стыков крышек коренных подшипников (на 0,1...0,5 мм) для придания необходимой формы поверхности. Незначительно отличаются по затратам между собой способы 1 и 2. Способ 1 включает предварительную обработку восстанавливаемых поверхностей, изготовление ДРД, установку их с закреплением приваркой, заклепками или силами упругости. Дополнительные ремонтные детали устанавливают на поверхностях коренных опор и их торцов, в отверстиях под гильзы и под коробку передач. Способом 2 наносят покрытие на поверхности коренных опор, отверстия в картере сцепления и их торцов. Способ 3 применяют для нанесения покрытий на поверхности отверстий в коренных опорах и картере сцепления.

Сопоставление затрат дает такие результаты:

- при объемах ремонта 6,3 тыс. блоков цилиндров в год затраты по вариантам 1 и 2 примерно одинаковы, при меньших объемах ремонта предпочтительнее способ 1, а при больших – способ 2;
- при увеличении N преобладающее влияние оказывает трудоемкость способа 2, хотя стоимость материалов при способе 2 больше, чем при способе 1. Способ 3 обладает большой производительностью нанесения покрытия, но он требует применения дорогих и дефицитных материалов, однако небольшое машинное время их нанесения делает выгодным способ 3 в сравнении со способом 1, начиная с $N = 16$ тыс./год и более эффективным по сравнению со способом 2, начиная с $N = 18$ тыс./год. Способ 5 при всех значениях объемов ремонта более предпочтителен.

Изношенные резьбы восстанавливают нарезанием резьбы ремонтного размера или заваркой отверстий с последующим сверлением отверстий и нарезанием резьбы номинального размера, или ввинчиванием резьбовых вставок в предварительно нарезанную резьбу большего диаметра.

Отверстия в коренных опорах и во втулках распределительного вала растачивают в одном установе на специальных станках, но с базированием по плоскости прилегания к масляному картеру, к которой не ориентированы ни одна из основных поверхностей детали.

Направления совершенствования процесса. Сварка в разделку обладает склонностью к образованию околошовных трещин. В силу значительных стягивающих напряжений и невысокой склонности к образованию околошовных трещин наиболее приемлемой с точки зрения герметичности является сварка со швами поперек трещины.

Предлагается следующий процесс устранения трещин на стенках и перемычках чугунных блоков цилиндров. Трещину не разделяют, а ее концы не засверливают. Трещину кернят по ее линии через 15...20 мм, поскольку после зачистки она становится невидимой. Зачищают поверхность вокруг трещины «как чисто», а ее снова кернят, чтобы линия была видна при сварке. Риски от зачистки должны располагаться перпендикулярно предполагаемой линии развития трещины. Вместо кернения края трещины можно заглубить на 1,0...1,5 мм в тело детали. Наличие на поверхности детали литевой корки, рыхлот, черновин, ржавчины, влаги, пыли и других загрязнений вызывает образование пористости швов, поэтому стенки зачищают до металлического блеска. Масло и влагу выжигают пламенем газовой горелки.

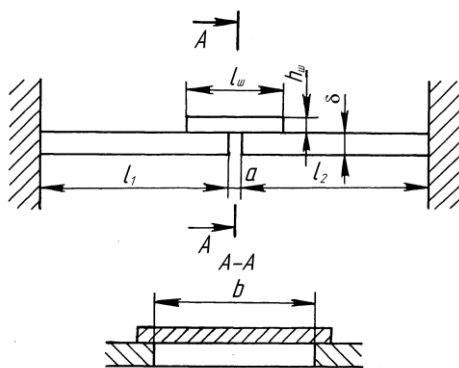


Рис. 5. Схема сварного соединения при устранении трещины:
 a , b – соответственно ширина и длина трещины, м

Укорачивающиеся швы при охлаждении плотно смыкают поверхности трещины.

Укорочение сварного шва $\Delta l_{ш}$ при свободном охлаждении, если температура металла изменяется от температуры его плавления до комнатной (точка 2 на графике, рис. 6), составляет

$$\Delta l_{ш} = a l_{ш} (T_{пл} - T_0), \text{ м}, \quad (1)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала сварного шва, $1/K$; $l_{ш}$ – длина сварного шва, м; $T_{пл}$ и T_0 – температура плавления материала сварного шва и температура комнатная, К.

Если не допустить сокращения длины сварного шва сопротивлением стенок детали, то сила его растяжения P , отнесенная к единице ширины, равна (точка 1 на графике, рис. 6)

$$P = \frac{\alpha l_{ш} (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{l_{ш}} = \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}, \text{ Н/м}, \quad (2)$$

где $E_{ш}$ – модуль нормальной упругости материала сварного шва, МПа; $h_{ш}$ – высота сечения сварного шва, м.

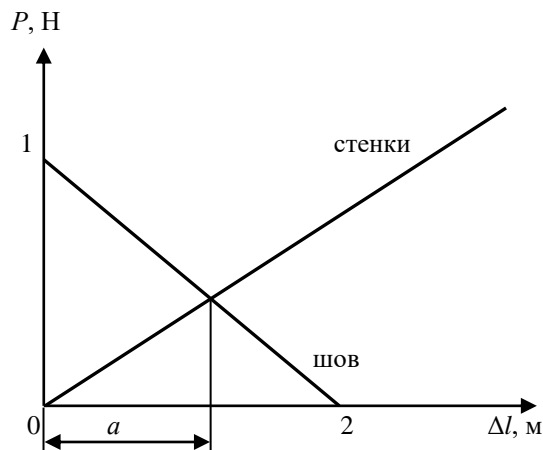


Рис. 6. Зависимость усилий P в сварном шве и стенках детали от деформации Δl

Сила, отнесенная к единице ширины сварного шва, необходимая для стягивания стенок детали и закрытия трещины шириной $\Delta l = a$, равна (на рисунке 6 график силы проходит через начало координат)

$$P = \frac{E_0 \Delta l \delta}{l_1 + l_2}, \text{ Н/м}, \quad (3)$$

где E_0 – модуль нормальной упругости материала детали, МПа; δ – толщина стенки детали, м; l_1 и l_2 – длина стягиваемых участков стенки, м.

Уравнение прямой, проходящей через точки 1 и 2, имеет вид:

$$\frac{\Delta l - 0}{l_{ш} \alpha (T_{пл} - T_0) - 0} = \frac{P - \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{0 - \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}, \quad (4)$$

откуда

$$P = - \frac{\Delta l E_{ш} h_{ш} - l_{ш} \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{l_{ш}}. \quad (5)$$

Сравнивая уравнения (3) и (4), находим равновесную деформацию Δl :

$$\Delta l = \frac{\alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш} l_{ш} (l_1 + l_2)}{E_{ш} h_{ш} (l_1 + l_2) + E_0 \delta l_{ш}}.$$

Расчеты показывают, что если края стенки толщиной 10 мм с трещиной защемлены, а длина сварных швов высотой 4 мм равна 20 мм, то эти швы стягивают трещину шириной до 0,04 мм. Однако сведения не согласуются с результатами, полученными ранее другими исследователями [3]. Для получения надежных результатов необходимо стенки с трещинами перед их сваркой стягивать резьбовыми струбцинами.

Сварку ведут самозащитной проволокой ПАНЧ-11 (состав: Ni – 80 %, Cu – 2...3 %, Mn – 1...4 %, редкоземельные элементы – 0,1...0,5 %, Fe – остальное) диаметром 1,2 мм полуавтоматами А-825М, ПДГ-305, А-547 и др. Режим сварки: напряжение 14...16 В (для толстостенных водяных рубашек напряжение повышают до 18 В), сила тока 80...140 А, скорость сварки 4...5 м/ч, полярность обратная. Указан-

ное пониженное напряжение исключает образование холодных трещин. Обратная полярность снижает пористость швов. Швы проковке и механической обработке не подвергаются. Структура шва представляет собой высоколегированный аустенит твердостью НВ 170...180 с включениями графита и сульфидов. У двигателей, поступивших в очередной ремонт, не наблюдалось повторного возникновения трещин на стенках водяных рубашек, однако отмечены редкие случаи нарушения герметичности сварных швов из-за пор и раковин.

Детали из алюминиевых сплавов сваривают прутками диаметром 3...4 мм того же состава, что и основной металл, а также проволокой Св-АК5 или Св-АК10. Режим аргонодуговой сварки при толщине стенки 4...6 мм следующий: сила тока 150...270 А, напряжение 18...20 В, расход аргона 7...10 л/мин. При добавлении к аргону 10...12 % (по объему) диоксида углерода и 2...3 % кислорода повышается устойчивость горения дуги и улучшается формирование металла. Для аргонодуговой сварки применяют водоохлаждаемые горелки ГРАД-200 или ГРАД-400, подключенные к источникам питания переменного тока УГД-301 или УДГ-501.

Восстановление отверстий под подшипники в большинстве случаев связано с наплавкой покрытий, что приводит, во-первых, к деформированию детали за счет структурных превращений, сопровождающихся большими внутренними напряжениями, и, во-вторых, к большому расходу материалов и объему обработки резанием, в результате которой почти весь материал покрытия срезается. Малую толщину восстановительного покрытия, соизмеримую с несоосностью отверстий и припуском на обработку, обеспечивает вневанное железнение. Обработка резанием – это жесткое хонингование с ориентированием хонинговальной головки во втулках и базированием заготовки по поверхности под головку цилиндров и боковой поверхности паза под крышки коренных подшипников. Такая операция обеспечивает минимальный расход материалов для нанесения покрытий и нормативное расположение оси отверстий в коренных опорах относительно других поверхностей детали, в том числе – плоскости под головку цилиндров [4; 5]. Обрабатывать плоскость под головку цилиндров при восстановлении детали нет необходимости.

Коренные опоры, отверстия в картере сцепления и под стартер предварительно растачивают с базированием по стыковой плоскости к головке цилиндров и крайним отверстиям под гильзы цилиндров. Затем предварительно обработанные отверстия вместе с начерно отдельно обработанными втулками распределительного вала растачивают окончательно с прежним базированием.

Торцы первой коренной опоры подрезают с базированием по обработанным коренным опорам и поверхности отверстия под гильзу первого цилиндра. Торцы картера сцепления подрезают с базированием по коренным опорам и обрабатываемой поверхности. Последняя база обеспечивает снятие припуска наименьшей толщины.

Отверстия под толкатели развертывают под ремонтный размер с направлением инструмента по обрабатываемой поверхности. Торцы отверстий под гильзу цекуют ручным инструментом с базированием его по плоскости под головку цилиндров. Значения параметров расположения осей цилиндров и оси коренных опор зависят от точности обработки гильз цилиндров, которые восстанавливаются отдельно. Отверстия под гильзы цилиндров в результате эксплуатационных нагрузок принимают форму овала. Большая его ось расположена в плоскости качения шатуна и превышает меньшую ось до 0,07 мм. Гильзы, установленные в такие отверстия, принимают их форму. Точность указанных параметров обеспечивают следующим образом. Гильзы цилиндров собирают с блоком, имея припуск на окончательное растачивание и хонингование. Гильзы жестко фиксируют в отверстиях блока с помощью прижимов. Отверстия в гильзах растачивают с базированием блока цилиндров по обработанным коренным опорам, переднему торцу первой коренной опоры и поверхности под головку цилиндров. Применяют позиционное растачивание с принудительным перемещением детали во время вспомогательного перехода на величину расстояния между осями цилиндров. Гильзы хонингуют также в сборе их с блоком цилиндров. Гильзы не только не разукрупняют с блоком цилиндров, но и не изменяют их положения, приданного им при первоначальной установке.

Предложенный процесс обработки блока цилиндров в сборе с картером сцепления допускает нанесение покрытий в два-три раза меньшей толщины, чем при традиционных процессах восстановления, с достижением точности взаимного расположения поверхностей (как обрабатываемых, так и необрабатываемых при восстановлении), установленной заводом-изготовителем.

Восстановление поврежденных резьбовых отверстий эффективно путем установки спиральных резьбовых вставок из проволоки ромбического сечения. Материал спиральной вставки – коррозионно-стойкая аустенитная хромоникелевая сталь 12Х18Н9Т или 12Х18Н10Т. Проволоку получают путем волочения проволоки круглого сечения на станке ВФР-4.

Способ позволяет повысить прочность резьбовых отверстий, восстанавливать резьбы в тонкостенных деталях под номинальный размер и снизить износ резьбовой поверхности при разборке и сборке агрегата. Соединения со спиральными вставками хорошо работают при динамических нагрузках. Проч-

ность таких соединений на 35...40 % выше, а частота их отказов в 5...7 раз ниже, чем соединений без вставок. Объясняется это тем, что в спиральной вставке нагрузка на витки распределяется более равномерно по причине их большей податливости. Сравнение способов восстановления резьбовых отверстий приведено в таблице.

Показатели способов восстановления резьбовых отверстий

Способ восстановления	Относительная стоимость	Коэффициент долговечности
Обработка под ремонтный размер	1	0,95
Заварка	1,13	0,85
Установка резьбового трубчатого ввертыша	1,46	1,00
Установка резьбовой спиральной вставки	0,47	1,50

Контрольная операция в конце процесса восстановления включает:

- проверку чистоты детали, особенно масляных каналов;
- контроль на стендах герметичности рубашки охлаждения горячей водой при температуре 80... 90 °С под давлением 0,3...0,4 МПа и масляных каналов сжатым воздухом под давлением 0,5...0,6 МПа;
- сплошное измерение индикаторными нутромерами диаметров обработанных отверстий и параметров расположения (соосности отверстий коренных опор и отверстия под центрирующий поясok коробки передач, расстояния от оси коренных опор до плоскости прилегания головки цилиндров) индикаторными средствами;
- выборочное измерение в лабораторных условиях после наладки оборудования параметров расположения (перпендикулярности и пересечения осей отверстий под гильзы цилиндров к оси отверстий коренных опор, расстояние между осями отверстий коренных опор и во втулках распределительного вала, и отверстия под стартер) индикаторными средствами и шероховатости поверхностей профилометрами.

Заклучение. В результате проведенного исследования предложен *оптимальный технологический процесс восстановления корпусных деталей* (на примере блоков цилиндров автотракторных двигателей), отличающийся обоснованным выбором технологических баз при обработке резанием ремонтной заготовки (обеспечивающим нормативное расположение друг относительно друга рабочих поверхностей), сварке трещин в стенках, обоснованным способом восстановления резьбовых отверстий, структурой и содержанием процесса (обеспечивающим более полное использование остаточной долговечности деталей и минимальную трудоемкость их восстановления). Из способов восстановления элементов детали с применением источников тепла допустимо оставить лишь сварку для закрепления обломанных фланцев и приливов и устранения трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников, А.А. Расчет срока службы блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания до появления трещин и способы их ремонта / А.А. Мельников // Труды ГОСНИТИ, 1980. – Т. 62. – С. 23 – 30.
2. Иванов, В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин: учебник / В.П. Иванов. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458 с.
3. Справочник сварщика / под ред. В.В. Степанова. – М.: Машиностроение, 1983. – 560 с.
4. Иванов, В.П. Подготовка ремонтного производства: науч. изд. / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – 272 с.
5. Кастрюк, А.П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей: науч. изд. / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2012. – 199 с.

Поступила 14.06.2013

RESTORATION OF MOTOR AND TRACTOR AGGREGATES' BODY PARTS

V. IVANOV, A. KASTRUK

The technical state of body parts and found the proportion of the parts with gashes, cracks and elements distortion that change their size, shape, and relative disposition are investigated. The structure and working operations sequence of a body part restoration process providing the most complete use of its remaining life are substantiated. A new way to eliminate the cracks and a new sequence of a workpiece locating at its machining are offered. It is recommended to limit the application of heat sources at restoration of parts.

УДК 621.914.3

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

д-р техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача повышения эффективности использования станков и станочных комплексов с числовым программным управлением посредством введения в процесс резания кинематической неустойчивости регулированием подачи в функции пути. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров нестационарного резания на эксплуатационные характеристики передачи винт-гайка качения. Показано, что режим изменения подачи в функции пути оказывает влияние на закон распределения погрешности позиционирования исполнительного органа станка. Обоснована возможность использования энтропийной погрешности и энтропийного коэффициента стабильности для оценки точности позиционирования при различных режимах разгона (замедления).

Введение. Научно-технический прогресс в машиностроении неразрывно связан с широким внедрением станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Относительная доля оборудования с ЧПУ в станочном парке предприятий машиностроения постоянно возрастает, и в этой связи все более актуальными становятся вопросы их эффективной эксплуатации. В ряде случаев эту задачу решают путем преднамеренного введения в процесс резания кинематической неустойчивости. Чаще – это закономерное изменение подачи или скорости резания. Например, на станках с ЧПУ токарной группы за счет модулированного изменения подачи добиваются повышения производительности, точности и виброустойчивости процесса обработки нежестких заготовок, а периодическое прерывание подачи эффективно используется для кинематического дробления стружки [1; 2]. При этом в процессе резания на силовые воздействия циклического характера, обусловленные неконтролируемыми изменениями физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, припуска на обработку, неоднородностью пластической деформации и т.п., накладываются силовые воздействия, вызываемые переменной подачей и скоростью резания. В результате колебательные процессы в технологической системе меняют свой характер, что оказывает влияние на эксплуатационные характеристики отдельных узлов и механизмов станка. Прежде всего, это касается механизмов привода подач. Например, периодическое изменение подачи в функции пути оказывает влияние на жесткость передачи винт-гайка качения, а также на ее демпфирующую способность. От этих характеристик зависит точность позиционирования исполнительного органа станка, которая для станков с ЧПУ играет особую роль и характеризуется ошибкой выхода в заданную точку.

Основная часть. Привод подач современных станков с ЧПУ характеризуется короткой кинематической цепью, состоящей обычно из электродвигателя и передачи винт-гайка качения (ВГК). При воздействии на такую передачу циклических нагрузок ее жесткость и демпфирующая способность со временем изменяются. Но от указанных характеристик в значительной мере зависят долговечность передачи и точность позиционирования исполнительного органа станка. В связи с этим возникает необходимость в исследовании влияния параметров переменной подачи на статистические показатели точности позиционирования. Полученные результаты могут быть использованы при выборе законов и диапазонов регулирования подачи в целях повышения эффективности применения станков с ЧПУ, а также при создании адаптивных систем, в которых в качестве управляющего воздействия используется подача.

В качестве объекта исследования был выбран токарный полуавтомат мод. 1А751Ф3 класса точности П с микропроцессорным устройством ЧПУ типа КМ 65. Станок вертикальной компоновки оснащен двумя крестовыми суппортами с четырехпозиционными револьверными головками. Перемещение каждого суппорта в продольном и поперечном направлениях осуществляется комплектными приводами с высокомоментными двигателями постоянного тока через передачу ВГК. Параметры передачи: условный диаметр резьбы $d_0 = 63$ мм; диаметр шариков $d_1 = 6$ мм; шаг резьбы $p_p = 10$ мм. Дискретность задания размеров составляет 0,001 мм по всем координатам.

Исследование точности позиционирования проводили для продольной координаты правого суппорта (ось Z) при различных изменениях подачи. Для измерений использовали штриховую меру (стеклянную линейку длиной 600 мм) и оптический микроскоп с ценой деления шкалы $1 \pm 0,2$ мкм.

Эксперимент проходил в три этапа. На первом этапе осуществляли исследование точности позиционирования с модулированной подачей. Параметры модулированного изменения подачи S_{\min} , S_{\max} , I_1 , ΔS

задавали в кадре управляющей программы совместно с другой геометрической и технологической информацией. Путем их варьирования достигались различные соотношения между S_{\min} и S_{\max} (размахи между их величинами). Причем верхняя пиковая величина подачи оставалась постоянной и равной 200 мм/мин. На втором этапе был реализован режим прерывания подачи. Подачу 180 мм/мин прерывали с частотой $f_n = 2,5$ Гц на время, которое затрачивается на фиктивное перемещение L_A , равное 0,4 мм. Величина перемещения резца между прерываниями подачи L_B при этом была 0,8 мм. На третьем этапе перемещение по исследуемой координате выполняли с постоянной подачей $S = 150$ мм/мин, равной средней величине модулированной подачи при отношении $S_{\min}/S_{\max} = 0,5$.

Точность позиционирования оценивали следующими статистическими показателями: алгебраической разностью наибольшего и наименьшего (на контролируемом участке) среднеарифметических отклонений фактических положений от запрограммированных; величиной рассеяния отклонений при многократном подходе к запрограммированному положению [3]. Первый показатель характеризуется накопленным отклонением f_n , второй – среднеквадратическим отклонением σ .

Статистические показатели определяли по результатам измерений, выполненных в контрольных точках отдельно для положительного и отрицательного направлений движения. Контрольными точками служили границы интервалов, на которые был разбит контролируемый участок \bar{L}_z . Длину интервалов l_u выбирали в зависимости от длины рабочего перемещения, которая для исследуемой координаты Z была принята равной 40 мм (при числе контролируемых точек $q = 11$).

Для каждой j -й контролируемой точки вычисляли:

- отклонения f_{ij} от значения первого отсчета δ_{11} , т.е. $f_{ij} = \delta_{11} - \delta_{ij}$, где δ_{ij} – отсчет в j -й точке при i -м подходе (с учетом знака);

- среднее арифметическое значение отклонений \bar{f}_j :

$$\bar{f}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} f_{ij},$$

где n_j – число подходов к j -й точке;

- среднее квадратическое отклонение координаты позиционирования σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (f_{ij} - \bar{f}_j)^2}.$$

Накопленное отклонение при этом определяется следующим образом:

$$f_n = \bar{f}_{\max} - \bar{f}_{\min},$$

где $\bar{f}_{\max} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \bar{f}_{j_{\max}}$; $\bar{f}_{\min} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \bar{f}_{j_{\min}}$.

Основные статистические характеристики распределений погрешностей позиционирования (среднее арифметическое значение \bar{x} и среднее квадратическое отклонение σ) вычисляли при выборке большого объема ($n = 100$). Полученные эмпирические распределения сравнивали с распределением по закону Гаусса. Удовлетворительность соответствия проверяли по критерию согласия Пирсона (χ^2) [4].

Параметры распределений погрешностей позиционирования в точке на расстоянии 200 мм от фиксированной точки станка (определяется относительно начала координат станка) приведены в таблице 1. Зависимость накопленной погрешности позиционирования от соотношения между пиковыми величинами модулированной подачи представлена на рисунке 1.

В результате анализа экспериментальных результатов исследований установлено, что режим изменения подачи оказывает влияние на точность позиционирования. Например, при увеличении размаха между пиковыми величинами модулированной подачи установлен рост f_n и σ . Кроме того, при модулированной подаче с отношением $S_{o_{\min}}/S_{o_{\max}} < 0,5$ и прерывании подачи эмпирические распределения погрешностей позиционирования представляют собой функции с распределениями, отличными от нормального.

В этом случае усложняется оценка максимальной погрешности и стабильности, появляется необходимость введения меры погрешности, которая могла бы сопоставить результаты эксперимента при различных изменениях подачи на участке позиционирования. В качестве таких критериев использова-

лись энтропийный коэффициент стабильности C_H и энтропийная величина погрешности Δ_H , которые определяются по выборке, содержащей конечное число конкретных значений случайной величины [5; 6].

Таблица 1

Параметры распределений погрешностей позиционирования

Режим перемещения	Параметры подачи	Параметры распределения	
		x , мм	σ , мкм
Модулированное изменение подачи	$S_{\min} = 150$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 1,0$ мм $\Delta S = 0,1$ мм/мин $\Delta l = 0,002$ мм	1,15	1,81
	$S_{\min} = 100$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 1,0$ мм $\Delta S = 0,1$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм	1,31	1,85
	$S_{\min} = 50$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 0,75$ мм $\Delta S = 0,2$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм	0,28	1,93
	$S_{\min} = 20$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 0,9$ мм $\Delta S = 0,2$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм	0,64	1,96
Прерывание подачи	$S = 180$ мм/мин $f_n = 2,5$ Гц $L_A = 0,4$ мм $L_B = 0,8$ мм	0,52	2,08
Постоянная подача	$S = 150$ мм/мин	0,75	1,68

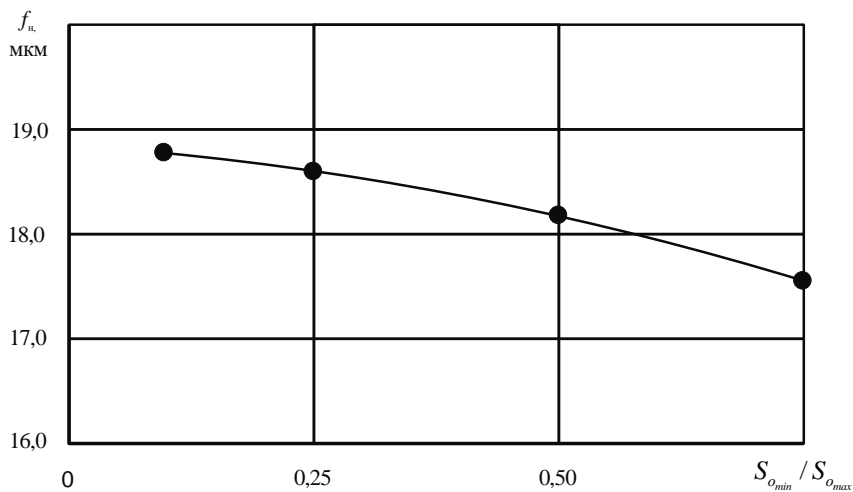


Рис. 1. Зависимость накопленной погрешности позиционирования f_n от отношения S_{\min} / S_{\max} при модулированном изменении подачи

Зависимости C_H и Δ_H от соотношения между пиковыми величинами модулированной подачи представлены на рисунке 2. Значения C_H и Δ_H определяли для параметров переменной подачи, приведенных в таблице 1. Например, при перемещении с прерыванием подачи ($S = 180$ мм/мин, $L_A = 0,4$ мм, $L_B = 0,8$ мм) $C_H = 0,442$, $\Delta_H = 3,83$ мкм. При перемещении с постоянной подачей $S = 150$ мм/мин $C_H = 0,413$; $\Delta_H = 3,36$ мкм.

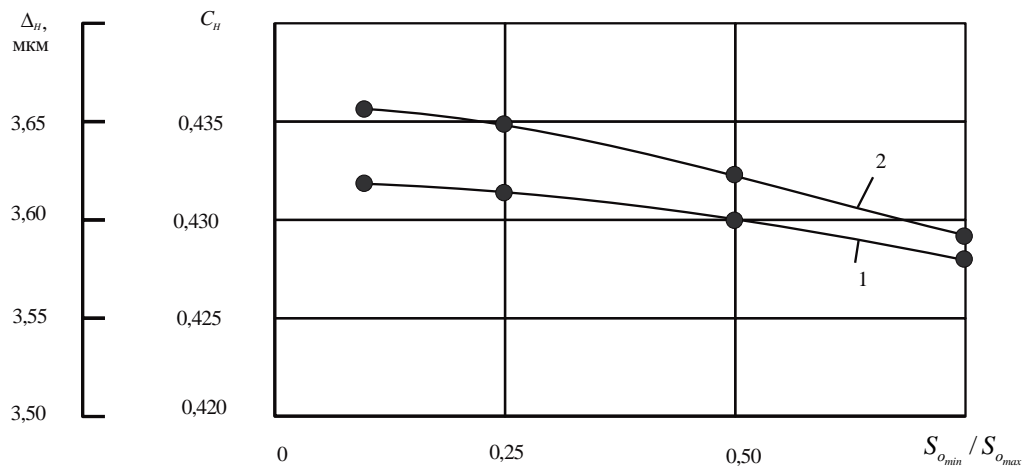


Рис. 2. Зависимости энтропийного коэффициента стабильности C_H (1) и энтропийной погрешности Δ_H (2) от отношения $S_{o_{min}} / S_{o_{max}}$ при модулированном изменении подачи

Результаты анализа этих зависимостей свидетельствуют о том, что режим изменения подачи в пределах аттестуемой длины влияет на закон распределения погрешности позиционирования. Причем изменение закона распределения связано с величиной энтропийной погрешности Δ_H и величиной энтропийного коэффициента стабильности C_H . Для исследуемых режимов перемещения коэффициент энтропийной стабильности C_H изменяется от 0,413 (обработка с постоянной подачей) до 0,442 (обработка с прерыванием подачи), а величина энтропийной погрешности Δ_H — соответственно в пределах от 3,36...3,83 мкм. Для модулированного изменения подачи величины C_H и Δ_H укладываются в обозначенные диапазоны.

Такую эволюцию энтропийных оценок законов распределения (C_H, Δ_H) можно объяснить изменением влияния ряда факторов на процесс позиционирования с переменной подачей. Это, прежде всего, упругие деформации в передаче ВГК, трение в направляющих, увеличение относительной величины отдельных компонентов погрешности.

Эксплуатационные характеристики передачи ВГК исследовали на примере продольной координаты Z правого суппорта токарного станка с ЧПУ мод. 1A734Ф3. Параметры передачи, кроме поясненных выше d_0 , d_1 и p_p , следующие: коэффициент, учитывающий погрешности изготовления резьбы винтового механизма $k_z = 0,8$; угол контакта шариков с винтом и гайкой $\alpha_u = 45^\circ$; угол подъема резьбы $\beta_p = \arctg[p/(\pi d_0)] = 2^\circ 54'$; угол трения $\rho_m = \arctg \mu = 0^\circ 3'$, где μ — коэффициент трения качения ($\mu = 85 \cdot 10^{-5}$). Масса суппорта с револьверной головкой, оснащенной режущим инструментом, и гайкой передачи ВГК $m_c = 486$ кг.

Обрабатывали заготовки детали типа цилиндр из стали 40ХН (длина 150 мм, наружный диаметр 200 мм, внутренний диаметр 162 мм). Заготовка, закрепленная в патроне консольно, вращалась с частотой 250 об/мин. Инструментами, установленными в револьверной головке левого суппорта, предварительно обрабатывали наружные и внутренние поверхности заготовки. При этом на наружной цилиндрической поверхности оставлялся припуск 1,5 мм на сторону, который снимали проходным резцом, установленным в револьверной головке правого суппорта. Это позволило исключить циклические нагрузки, вызываемые неравномерностью припуска.

Эксперименты проводили в три этапа. На *первом этапе* осуществлялось продольное точение правым суппортом с модулированной подачей, которая периодически плавно увеличивалась от $S_{o_{min}} = 0,2$ мм/об до $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об, а затем снижалась до первоначального значения; длина пути разгона (замедления) при этом была равна 0,75 мм. В результате за время обработки одной заготовки приводом продольной координаты правого суппорта производилось 100 циклов изменения подачи. На *втором этапе* заготовки обрабатывали с прерыванием подачи. По мере перемещения резца в осевом направлении на 1,5 мм подача величиной 0,375 мм/об периодически прерывалась на время одного оборота заготовки. Как и в предыдущем случае, число циклов изменения подачи было равно 100. На *третьем этапе* заготовки обрабатывались с постоянной подачей 0,3 мм/об, равной среднему значению модулированной подачи.

На каждом этапе обрабатывали пять партий заготовок по 6000 шт. При обработке первой детали из партии с помощью проволочных тензодатчиков, наклеенных на державку резца, измеряли осевую составляющую P_x силы резания. Было установлено, что при точении с модулированной подачей сила P_x периодически изменяется в пределах от 305,4 до 431,8 Н, а при точении с прерыванием подачи – от 0 до 412,2 Н.

В начале каждого этапа регулировали натяг в передаче ВГК. При этом силу предварительного натяга рассчитывали по формуле [7]:

$$Q_H = \frac{M_{xx}}{d_0 t g (\beta_p + \rho_m) k_z \sin \alpha_{uc} \cos \beta_p},$$

где M_{xx} – момент холостого хода, Н/м.

Предварительный натяг создавали поворотом одной полулайки передачи относительно другой с последующей фиксацией их положения. Момент холостого хода измеряли на специальном стенде. После обработки каждой партии заготовок определяли коэффициент жесткости $j_{жс}$ передачи, коэффициент демпфирования h_0 и точность позиционирования суппорта.

Коэффициент демпфирования находили из соотношения

$$h_0 = \frac{\Psi}{2\pi} \sqrt{m_c j_{жс}},$$

где Ψ – коэффициент относительного рассеяния энергии в передаче ВГК; m_c – масса суппорта с револьверной головкой, режущим инструментом и гайкой винтового механизма, кг.

Коэффициент Ψ вычисляли по зависимости [8]:

$$\Psi = 2\lambda_3 \frac{4\pi^2}{4\pi^2 + \lambda_3^2},$$

где λ_3 – логарифмический коэффициент затухания колебаний, определяемый по соответствующим осциллограммам.

Затухающие колебания регистрировали с помощью измерительного комплекса, состоящего из индуктивного датчика, блока измерений малых перемещений БИМП-2, шлейфового осциллографа и ПЭВМ. Коэффициент жесткости устанавливали по графику зависимости деформации δ_p резьбового соединения от осевой нагрузки $P_o(j_{жс} = P_o/\delta_p)$. Точность позиционирования устанавливали по накопленному отклонению фактических положений от запрограммированных f_n и среднеквадратическому отклонению σ при многократном подходе к запрограммированному положению. Значения f_n и σ определяли по методике, приведенной выше.

Значения отклонений f_n и σ , определенные после обработки очередной партии заготовок при различных режимах перемещения суппорта и $n_n = 60$, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Статистические характеристики погрешностей позиционирования

Количество обработанных заготовок n_s , шт.	Осциллирующее изменение подачи		Прерывание подачи		Постоянная подача	
	f_n	σ	f_n	σ	f_n	σ
	мкм		мкм		мкм	
0	16,3	1,42	16,1	1,41	16,2	1,42
6000	16,8	1,49	16,9	1,53	16,7	1,46
12000	17,3	1,55	17,6	1,62	16,9	1,51
18000	18,1	1,71	18,7	1,78	17,2	1,59
24000	18,8	1,83	19,5	1,89	17,6	1,66
30000	19,2	1,95	20,4	2,01	17,9	1,74

Закономерности изменения коэффициентов жесткости $j_{жс}$ и демпфирования h_0 в зависимости от количества обработанных заготовок представлены соответственно на рисунках 3 и 4. Графики строились по средним значениям из 30 измерений.

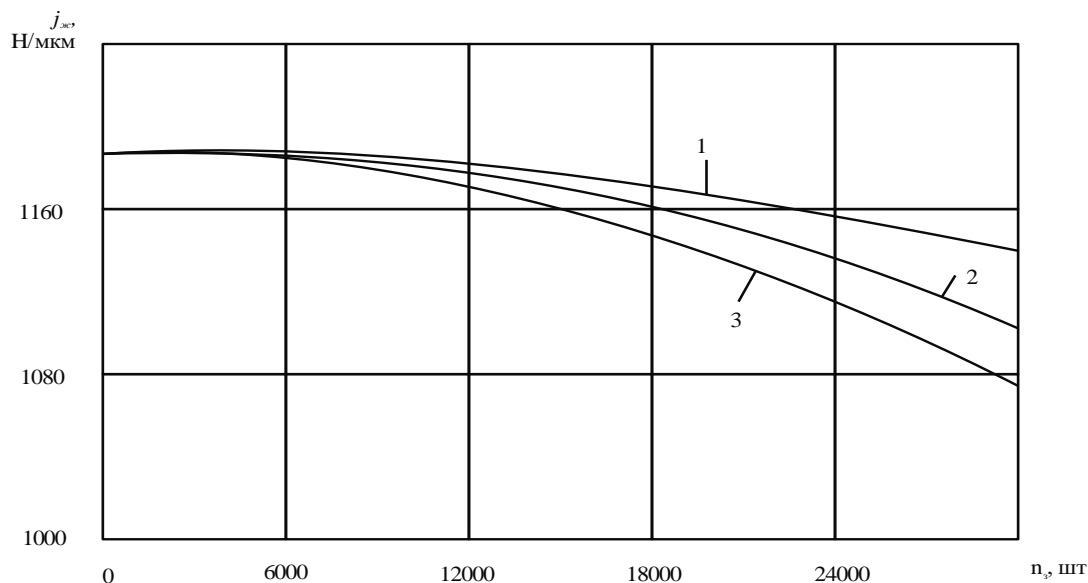


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости $j_{жс}$ от количества заготовок n_z , обработанных на станке:
1 – с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей; 3 – с прерыванием подачи

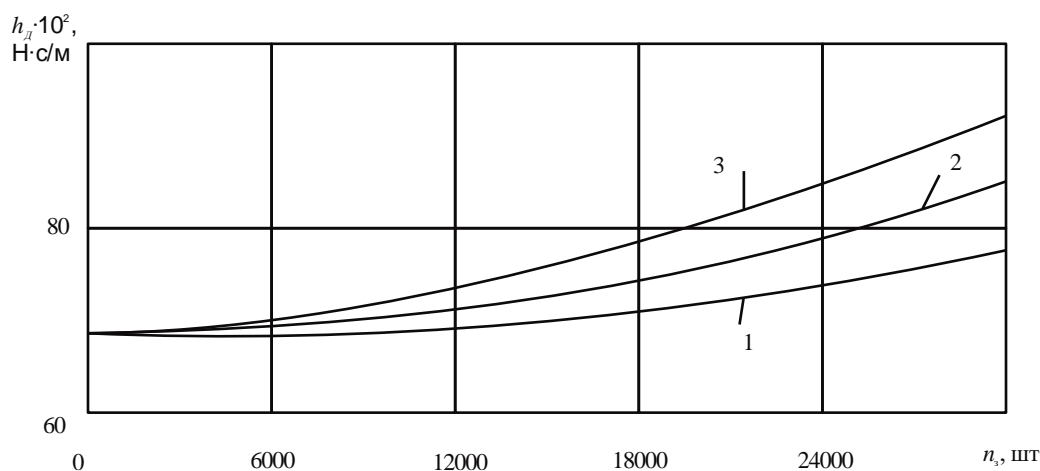


Рис. 4. Зависимость коэффициента демпфирования $h_д$ от количества заготовок n_z , обработанных на станке:
1 – с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей; 3 – с прерыванием подачи

Как видно из экспериментальных данных, режим обработки с переменной подачей и его продолжительность (число обработанных заготовок) оказывают влияние на жесткость передачи и ее демпфирующую способность. Причем с увеличением числа обработанных заготовок значение $j_{жс}$ уменьшается, а значение $h_д$ возрастает. Наиболее ярко это проявляется для режима обработки с прерыванием подачи. Уменьшение жесткости и увеличение демпфирующей способности передачи ВГК можно объяснить уменьшением фактической площади контакта тел качения с поверхностями винта и гайки, которое связано с увеличением остаточной деформации между сопрягаемыми элементами передачи (шариками и винтовой дорожкой) и некоторым их износом. Продолжительное воздействие на передачу циклической нагрузки, вызванной переменной подачей, приводит также к уменьшению точности позиционирования. Это хорошо согласуется с данными о жесткости передачи и демпфирующей способности.

Заключение. Экспериментально установлено, что режим изменения подачи в функции пути оказывает влияние на закон распределения погрешности и точность позиционирования исполнительного органа станка. Изменение закона распределения связано с величиной энтропийной погрешности Δ_H и величиной энтропийного коэффициента стабильности C_H позиционирования. Энтропийная оценка стабильности позволяет сопоставить эмпирические результаты для различных законов распределения, а также учесть эволюцию этих законов, когда позиционирование в течение одного рабочего хода осу-

шествляется на различных режимах. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании точности формообразования деталей на оборудовании с ЧПУ.

Введение в процесс резания кинематической нестабильности посредством периодического изменения подачи в функции пути оказывает влияние на эксплуатационные характеристики передачи ВГК при числе циклов изменения подачи больше, чем $0,8 \cdot 10^6$, что выражается в уменьшении ее контактной жесткости (на 1,5...3 % при числе циклов изменения подачи в диапазоне $1,2 \cdot 10^6 \dots 1,8 \cdot 10^6$) и возрастании демпфирующей способности на 4,2...7 %. Точность позиционирования исполнительного органа станка при этом снижается (накопленное отклонение f_n на 4...7 %, а среднее квадратическое отклонение σ на 6...11 %). Это особенно заметно при точении с прерыванием подачи и сравнительно большом числе (более $1,2 \cdot 10^6$) циклов ее изменения.

Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при выборе параметров переменной подачи в целях повышения виброустойчивости процесса обработки нежестких заготовок или кинематического дробления стружки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каштальян, И.А. Эффективные кинематически нестабильные процессы формообразования на токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Машиностроение: сб. науч. тр. – Вып. 18. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – С. 310 – 316.
2. Kashtalyan, I.A. Entropic Accuracy in Assessment of Coordinate Displacement with Varying Advance on Turning Flexible Production Modules / I.A. Kashtalyan // Dynamics of Machine Aggregates: Proceedings of the 4-th International Conference, Trnava, Slovak Republic, 21 – 23 September 1998 / Slovak University of Technology. – Trnava, 1998. – P. 75 – 78.
3. Ратмиров, В.А. Управление станками гибких производственных систем / В.А. Ратмиров. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Новицкий, П.В. Основы информационной теории измерительных устройств / П.В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
6. Пашкевич, В.М. Оценка состояния механизмов по энтропии диагностических параметров / В.М. Пашкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 3. – С. 50 – 56.
7. Кочергин, А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов / А.И. Кочергин. – Минск: Выш. шк., 1991. – 382 с.
8. Чернявский, П.М. Количественные оценки рассеивания энергии механических систем / П.М. Чернявский, В.И. Локтев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 14 – 19.

Поступила 05.02.2013

INFLUENCE OF CUTTING PROCESS KINEMATIC INSTABILITY ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF NUMERICALLY-CONTROLLED CUTTING MACHINES

I. KASHTALYAN

The problem of numerically-controlled machines and machine systems' efficiency increase by insertion of the kinematics instability in the cutting process by feed control in the function of path is considered. The results of experimental research of unstable cutting parameters influence on the performance characteristics of rolling screw-motion drive are presented. It is shown, that change mode of feed in the function of path has the influence on distribution of positioning error of machine executive unit. The possibility of using of entropic uncertainty and entropic factor of stability for positioning accuracy evaluation at various modes of acceleration (deceleration) is substantiated.

УДК 621.7/9.048.7

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОКРЫТИЕМ ZrN НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКА

С.Ю. КОТОВ, канд. техн. наук, доц. Г.Я. БЕЛЯЕВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Проведен анализ и осуществлена классификация методов повышения долговечности подшипников качения. Изучено влияние процесса вакуумно-плазменного упрочнения тел качения подшипников покрытием ZrN различной толщины на характеристики долговечности радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305. Также проведен анализ причин отказов подшипников испытываемых партий и установлено влияние толщины покрытия на характеристики износа и долговечность испытываемых узлов трения. Выдвинуты предположения, объясняющие положительное воздействие покрытия на увеличение долговечности подшипников.

Введение. Основным методом повышения экономической стабильности Республики Беларусь в настоящее время является развитие конкурентоспособного производства, существование которого в современных рыночных условиях возможно только при использовании высокопроизводительного и надежного технологического оборудования, отвечающего всем современным требованиям охраны труда и экологической безопасности.

Одна из проблем современного машиностроения – повышение долговечности деталей и узлов механизмов. Актуальность проблемы особенно обостряется в связи с постоянным ужесточением условий работы изделий (высокие удельные нагрузки, повышенные температуры, воздействие агрессивных сред, отсутствие или недостаточное количество смазки между трущимися поверхностями и т.д.) и необходимостью экономии дорогостоящих дефицитных металлов и сплавов. На восстановление и изготовление новых деталей затрачиваются значительные материальные и трудовые ресурсы. В этой связи вопрос увеличения работоспособности подшипников качения является, на наш взгляд, одной из наиболее острых проблем, требующих особого внимания.

Проблема недостаточной долговечности узлов трения объясняется низкой стойкостью поверхностного слоя деталей, который в процессе эксплуатации подвергается разрушающим нагрузкам различного рода (истирание, усталостное выкрашивание, абразивное царапание, коррозия и т.д.). Следовательно, для повышения долговечности деталей, особенно работающих в условиях интенсивного изнашивания, решающее значение имеет получение поверхностных слоев с повышенными физико-механическими свойствами.

Анализ литературных источников показал [1 – 8], что методы увеличения долговечности подшипников качения можно разделить на условные группы, представленные на рисунке 1.

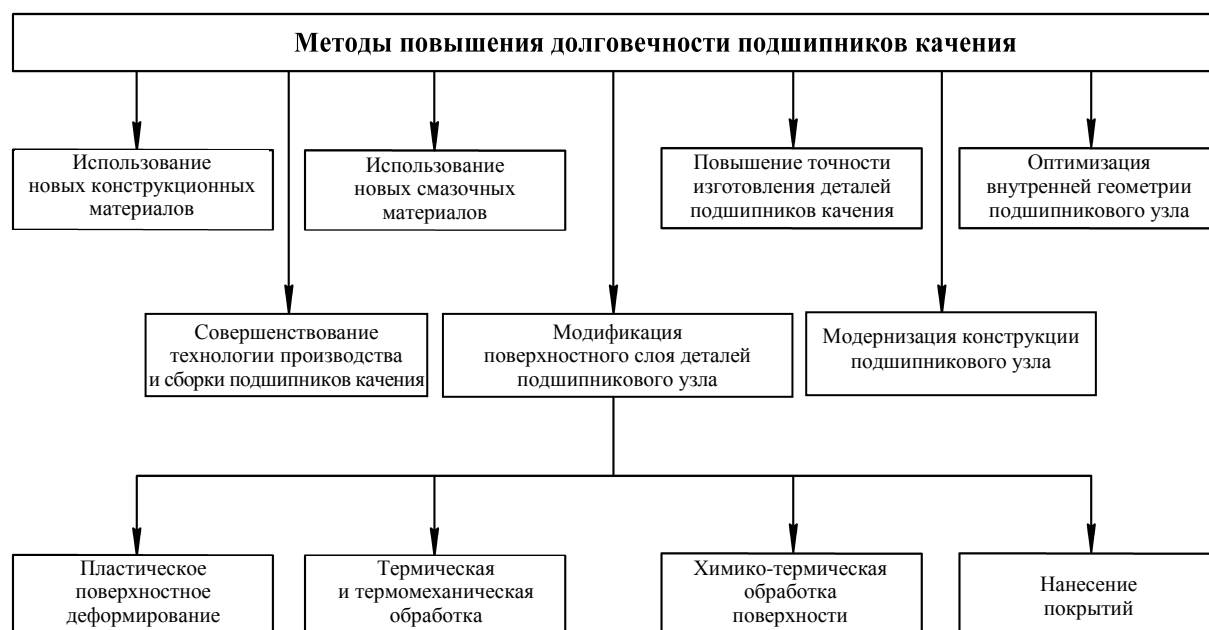


Рис. 1. Методы повышения долговечности подшипников качения

В настоящее время **наиболее распространенными методами повышения работоспособности подшипников качения** являются: *применение* новейших смазочных материалов и присадок к ним; *модификация* поверхностного слоя деталей подшипникового узла; *использование* подшипников из новейших материалов в особо тяжелых условиях эксплуатации. Стоит отметить, что наличие у данных методов явных недостатков, таких как высокая стоимость, низкая универсальность, невысокая эффективность и др., не позволила им получить широкого распространения.

Учитывая высокую эффективность применения упрочняющих вакуумно-плазменных покрытий для увеличения работоспособности подшипников скольжения, можно предположить, что использование данного метода применительно к подшипникам качения могло бы значительно увеличить их работоспособность при относительно небольших материальных затратах [9 – 11].

Цель данного научного исследования – определение влияния вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения покрытием ZrN на долговечность радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305.

Методика исследования. Нанесение покрытия ZrN на тела качения подшипника производили на вакуумно-дуговой установке УРМЗ.279.048 (ОНИ-6-008). В качестве приспособления использовали специальное устройство для нанесения покрытий в вакууме на сферические подложки.

Сравнительные испытания подшипников производили попарно на стенде ВНИПП-III-50-М с гидравлическим нагружением и электромеханическим измерителем момента сопротивления вращению.

Испытания проходили совместно: одна партия серийных радиально-упорных шариковых подшипников 6305 ГОСТ 520-89 производства ОАО «Минский подшипниковый завод» (10 шт.); три партии с упрочненными телами качения: 10 шт. с толщиной покрытия ZrN $h = 1$ мкм; 10 шт. с толщиной покрытия $h = 0,7$ мкм; 10 шт. с толщиной покрытия $h = 0,5$ мкм.

В ходе эксперимента регистрировалась амплитуда вибраций и температура наружного кольца подшипников датчиком термосопротивления методом прямого измерения. Условия испытаний двух партий подшипников выбирались так, чтобы теоретическая расчетная долговечность подшипников находилась в пределах 200...500 часов. Базовый расчетный ресурс для партии подшипников, согласно ГОСТ 18855-94, составил 261 час при частоте вращения внутреннего кольца $n = 0,6 \cdot n_{\max} = 6000 \text{ мин}^{-1}$ и радиальной нагрузке $F_R = 6000 \text{ Н}$. Испытания подшипников производились согласно ГОСТ 28428-90 до появления первичных признаков усталостного разрушения.

Условия смазки: принудительная капельная маслом И40А ГОСТ 20799-88 со скоростью подачи масла в подшипник 3 капли в минуту.

В целях чистоты эксперимента каждая испытуемая группа состояла из подшипников, собранных из деталей одной селективной группы. Величина радиального зазора всех подшипников составила 0,5 мм.

Обсуждение результатов испытаний. Согласно публикациям [12 – 14], применение вакуумно-плазменных покрытий в узлах трения значительно снижает коэффициент трения скольжения. Для установления влияния процесса упрочнения на эффективность работы испытуемых подшипников в ходе эксперимента регистрировалась величина сопротивления вращению вала, на котором были закреплены испытуемые подшипники. Сопротивление вращению без потерь на трение в опорных роликовых подшипниках представлено на рисунке 2.

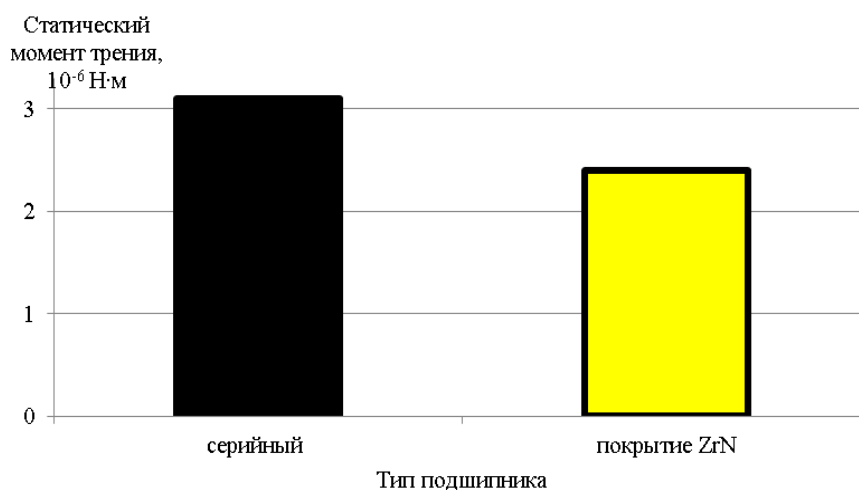


Рис. 2. Сравнительная диаграмма статических моментов трения для партий серийных и упрочненных шариковых подшипников 6305

Предположительной причиной снижения потерь на трение в упрочненных подшипниках стало наличие барьера при молекулярном взаимодействии поверхностей трения, в роли которого выступило покрытие. Подтверждением этого факта стали данные измерения температуры наружного кольца испытываемых подшипников.

Согласно полученным экспериментальным данным, температура упрочненного подшипника в установившемся режиме и в период приработки на 10...15 % меньше, чем у серийного. Этот факт объясняется тем, что во время работы подшипникового узла происходит потеря энергии, затрачиваемой на преодоление силы трения. Учитывая тот факт, что коэффициент трения в паре «PVD-покрытие – сталь ШХ15» несколько ниже, чем в паре трения «сталь ШХ15 – сталь ШХ15», количество тепла, выделяемое упрочненным подшипником в период эксплуатации, будет значительно меньшим.

Для партий серийных и упрочненных подшипников, испытанных на стенде, были определены регламентированные стандартом показатели работоспособности:

- *гарантированная долговечность* – фактическая долговечность в часах, которую превысили 90 % испытываемых подшипников партии при постоянных условиях испытаний с учетом только тех подшипников, которые отказали по признаку усталости металла;

- *средняя долговечность* – среднееарифметическое значение фактической долговечности всех подшипников в партии, определялась согласно формуле (1):

$$h_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}. \quad (1)$$

Гарантированная и средняя долговечность для партий подшипников представлена в виде сравнительных диаграмм на рисунке 3.

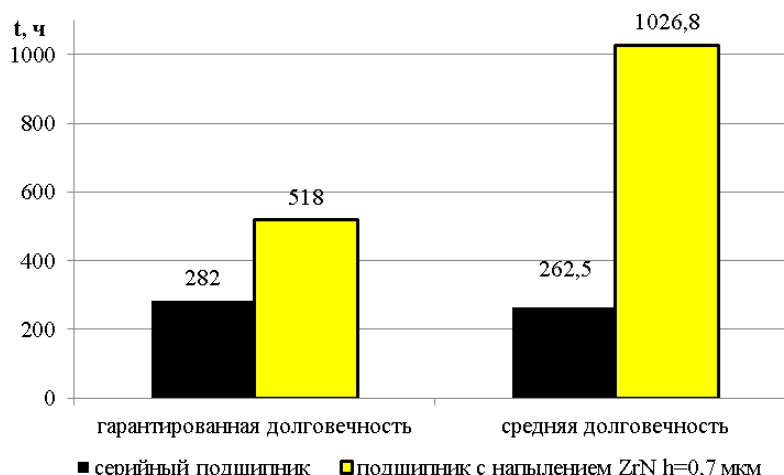


Рис. 3. Диаграммы гарантированной и средней долговечности для серийных и упрочненных шариковых подшипников 6305

- коэффициент рассеяния долговечности вычислялся согласно формуле (2):

$$K_p = \frac{h_{\max}}{h_{\min}}, \quad (2)$$

где h_{\max} – наибольшая долговечность подшипников в партии; h_{\min} – наименьшая долговечность подшипников в партии.

$$K_{R\text{серийный}} = 4,016, \quad K_{R\text{упрочненный}} = 5,21.$$

Относительно небольшое значение коэффициента рассеяния можно объяснить тем, что испытания проходили подшипники одной селективной группы, упрочненные подшипники имели покрытие высокого качества и малой толщины ($h \leq 1$ мкм), непостоянство которой незначительно сказалось на рассеянии результатов стендовых испытаний;

- коэффициент эксплуатационной стойкости – процентное отношение числа подшипников, отработавших срок службы, превышающий расчетную долговечность, к общему числу подшипников в данной партии определялось согласно формуле (3):

$$C_T = \frac{i - i_h}{i} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

В каждой партии подшипников единиц, не выстоявших расчетной долговечности, выявлено не было:

$$C_{TC} = C_{TV} = 100 \% .$$

Для определения влияния толщины покрытия на относительное увеличение долговечности подшипников и характеристики износа подшипников качения было произведено сравнение эксплуатационных показателей для каждой партии подшипников.

Зависимость увеличения долговечности упрочненного подшипника (по отношению к средней долговечности, продемонстрированной партией серийных подшипников во время испытаний) в зависимости от толщины упрочняющего покрытия представлена на рисунке 4.

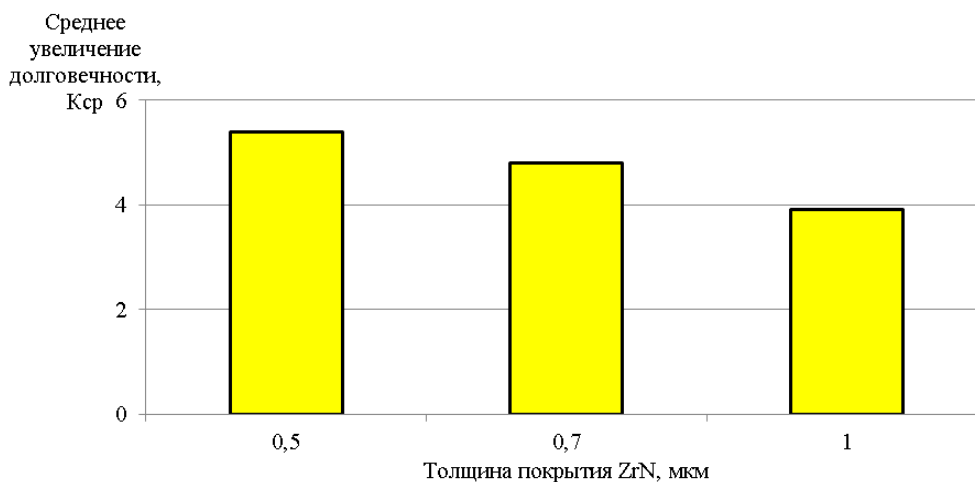


Рис. 4. Зависимость средней долговечности шарикового подшипника 6305 от толщины упрочняющего покрытия ZrN по отношению к средней долговечности серийных образцов

Согласно полученным результатам, наибольшее увеличение долговечности продемонстрировала партия подшипников с толщиной упрочняющего покрытия 0,5 мкм.

По всей видимости, механизм работы напыления, определяемый толщиной покрытия, можно условно разделить на «тонкие» и «толстые».

Тонкие покрытия (применительно к стендовым испытаниям, толщиной 0,5 мкм): основной причиной разрушения покрытия стало его постепенное истирание вследствие трибомеханического взаимодействия поверхностей трения. При таком механизме работы главным параметром покрытия, определяющим его эффективность, является толщина.

С *ростом толщины покрытия* (0,7 и 1 мкм) происходит увеличение внутренних напряжений в слое покрытия. В этом случае основной причиной разрушения покрытия будет являться его отслаивание от подложки. Высокие внутренние напряжения покрытия и его деформирование в результате работы подшипника качения приводят к образованию трещин и отслаиванию крупных фрагментов покрытия, являющихся по своей природе абразивом и оказывающих негативное влияние на долговечность подшипника.

С целью установления влияния покрытий различной толщины на причины отказа подшипников был произведен осмотр испытанных подшипников. Влияние толщины покрытия на причины отказов подшипников проиллюстрировано рисунком 5.

В результате анализа причин отказов подшипников было установлено:

- основной причиной отказов для всех партий подшипников стало усталостное разрушение металла на дорожках качения. Наряду с отсутствием перегрева подшипника в период испытаний и отсутствием разрушений деталей подшипников данный факт свидетельствует об удовлетворительных условиях смазки и допустимых режимах стендовых испытаний подшипников;

- нанесение упрочняющего покрытия малой толщины полностью исключает отказ подшипника по причине усталостного разрушения тел качения;

- нанесение покрытий толщиной порядка 0,5 мкм позволяет сократить число отказов подшипников по причине усталостного разрушения дорожек колец. Видимо, причиной этого явления стала минимальная изнашивающая способность покрытия малой толщины. При больших толщинах покрытия, вследствие высоких удельных напряжений в покрытии, происходит его отслаивание относительно крупными участками. Участки отслоившегося от подложки покрытия, будучи измельченными элементами качения подшипника и обладая высокой микротвердостью, оставаясь в зоне контакта поверхностей, приводят к появлению на поверхностях трения царапин, которые могут стать очагами развития усталостных трещин.

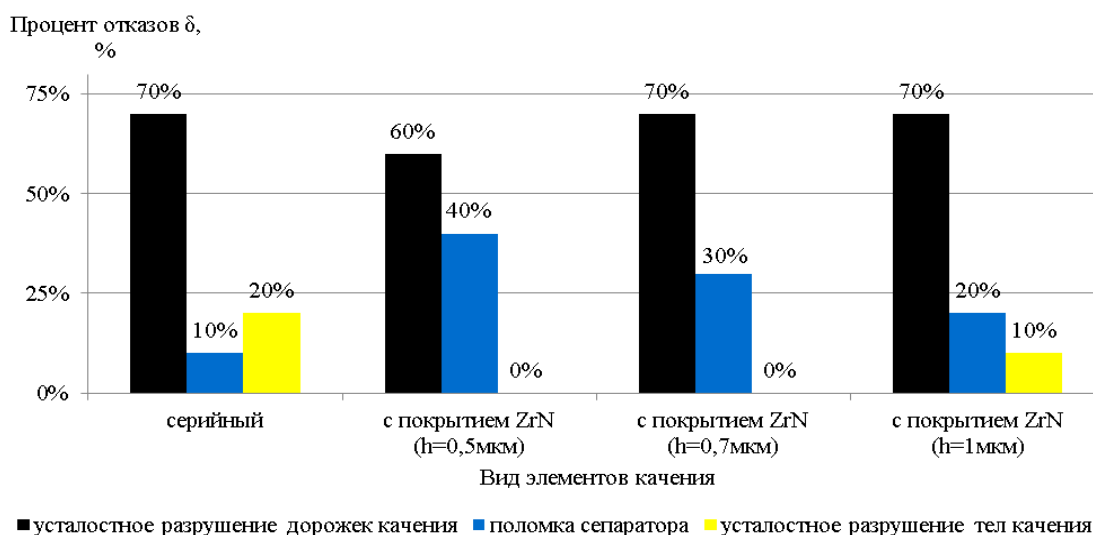


Рис. 5. Диаграмма причин отказов шариковых подшипников

Выводы:

- нанесение *PVD*-покрытия *ZrN* на элементы качения позволяет снизить потери на трение в подшипнике на 30...35 % по сравнению с серийными образцами;

- вакуумно-плазменное упрочнение элементов качения является высокоэффективным способом повышения долговечности и эффективности подшипников. Так, нанесение *PVD*-покрытия *ZrN* толщиной 0,7 мкм позволяет увеличить гарантированную долговечность подшипника 6305 в 2,1...2,2 раза, а среднюю – в 3,5...4 раза по сравнению с серийными образцами;

- одним из факторов, определяющих эффективность работы покрытия, является его толщина: применительно к исследуемым покрытиям, наибольшую работоспособность показали подшипники с покрытиями толщиной 0,5 мкм;

- вакуумно-плазменное упрочнение элементов качения покрытием толщиной 0,5...1 мкм существенно снижает вероятность выхода из строя подшипника вследствие усталостного разрушения шариков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спришевский, А.И. Повышение износостойкости и срока службы подшипников качения / А.И. Спришевский // Теория трения и износа. – 1965. – № 3. – С. 24 – 26.
2. Трение, изнашивание и смазка / И.В. Крагельский [и др.]; под. общ. ред. В.В. Алисиной. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
3. Лазаренко, Ю.А. Способы повышения износостойкости рабочих поверхностей прецизионных шарикоподшипников / Ю.А. Лазаренко, В.Ф. Старостин // Подшипниковая промышленность. – 1979. – Вып. 3. – С. 10 – 13.
4. Герасимов, Н.Н. Исследование волнистости рабочих поверхностей деталей радиальных шарикоподшипников на уровень вибрации / Н.Н. Герасимов, В.В. Суханова // Труды ВНИПП. – 1965. – № 2. – С. 74 – 83.
5. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости / Э.В. Рыжов // Трение и износ. – 1980. – № 1. – С. 147 – 149.

6. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
7. Загута, Н.Ф. Сверхдолговечные подшипники [Электронный ресурс] / Н.Ф. Загута. – Симферополь, 2008. – Режим доступа: <http://zagut.sitcity.ru>. – Дата доступа: 30.01.2013.
8. Герасимов, А.А. Исследование процесса бесцентрового упрочнения и влияние его наследственности на качество рабочей поверхности и долговечность деталей подшипников качения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.03 / А.А. Герасимов; Саратов. политехн. акад. – Саратов, 1979. – 25 с.
9. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж.А. Мрочек, Б.А. Эйзнер, В.А. Марков. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 95 с.
10. Костюк, Г.И. Физико-технические основы комбинированных технологий напыления покрытий, ионной имплантации, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения / Г.И. Костюк. – Харьков: АИНУ, 2002. – 1030 с.
11. Behrisch, R. Particle bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies / R. Behrisch, W. Eckstein // Springer. – 2007. – № 2. – P. 23 – 26.
12. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / С.Ф. Дудник [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – № 1. – С. 110 – 114.
13. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
14. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам / А.П. Любченко [и др.] // Трение и износ. – 1983. – № 5. – С. 892 – 897.

Поступила 03.04.2013

EFFECT OF VACUUM-PLASMA HARDENING OF THE ROLLING ELEMENT ZrN COATING FOR LIFE BEARING

S. KOTOV, G. BELYAEV

Analysis and classification methods for improving of durability of rolling bearings, influence the process of vacuum-plasma hardening of the rolling element bearings ZrN coating of varying thickness on the characteristics of durability of angular contact ball bearing, MPZ 6305 are made. Also the analysis of causes of failures of bearings of tested parties is made and the influence of the thickness of the coating on the wear characteristics and durability of test frictional units is established. Hypotheses are presented to explain the positive impact of the coating to increase bearing life.

УДК 621.926

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА НА АЭРОДИНАМИКУ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ПРОДУКТА В СРЕДНЕХОДНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

*А.С. ДОРОГОКУПЕЦ, д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. В.С. ФРАНЦКЕВИЧ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

Демонстрируется исследование аэродинамики воздушного закрученного пространственного потока в сечении помольно-классификационного агрегата, включающего валковую среднеходную мельницу и динамический классификатор, при помощи компьютерного моделирования. Представлены иллюстративные закономерности распределения профиля скоростей в горизонтальных и вертикальном сечениях. Показана эффективность классификации продукта при различных скоростях вращения корзины динамического сепаратора. Установлено, что попутное с основным потоком газовой среды вращение ротора обеспечивает более эффективную классификацию измельченного продукта.

Введение. До недавнего времени изучение поведения газожидкостных систем было ограничено экспериментальными методами, но в связи с быстрым ростом производительности компьютерных систем стало возможным анализировать и рассчитывать подобные процессы даже на персональных компьютерах. Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics) сегодня становится одной из составляющих процесса проектирования во множестве компаний, которые разрабатывают современное высокотехнологичное оборудование. Подобные расчеты позволяют получить характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения. Вычислительная гидродинамика используется во многих отраслях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, энергетическая. Теплообменное оборудование, вентиляция и кондиционирование воздуха, биомедицинские приложения, нефтяная и газовая промышленность, судостроение – это отрасли, в которых применение CFD-технологий становится залогом создания конкурентоспособных изделий.

В последнее время среднеходные мельницы, в частности валковые фирм «Леше», «Пфайфер», начали активно внедряться в Республике Беларусь. Это агрегаты исключительно сухого помола с воздушной классификацией, обладающие высокой производительностью и низкими удельными энергозатратами. С учетом двух указанных показателей это в первую очередь подходит для таких крупнотоннажных технологий, как производство цемента, извести, гипса, доломита, где и используются. В свою очередь, конструктивные особенности таких агрегатов предусматривают наличие линейки небольших габаритов, что обуславливает их применение в малотоннажных технологиях, например при производстве медпрепаратов.

Учитывая большие перспективы данного типа помольного оборудования, мы на протяжении последнего десятилетия активно занимались его исследованием и оптимизацией. Мотивацией для начала исследований были два аргумента: во-первых, страна, испытывающая большую потребность в помольных агрегатах, не может их постоянно покупать за рубежом; во-вторых, при использовании импортных измельчителей необходимы специалисты, которые будут квалифицированно осуществлять их эксплуатацию и ремонт.

В процессе предыдущих исследований детально изучен размольный узел среднеходной валковой мельницы: движение материала, воздушного потока в зоне помола [1], энергетики процесса [2]. На втором этапе исследовалась сепарационная зона [3], в том числе и с использованием компьютерного моделирования [4]. Одним из важных выводов всех исследований можно считать то, что для равномерного распределения несущего воздушного потока и предотвращения возможности провала материала под размольную тарелку воздух в подтарельчатое пространство должен подаваться тангенциально. Вторым выводом заключается в том, что оптимальной конструкцией устройства для классификации измельченного продукта следует считать динамический роторный классификатор.

Основная часть. В качестве объекта исследования принят динамический роторный классификатор среднеходной мельницы. Для равномерной подачи воздушной среды в зону помола снизу помольного агрегата выполнены три тангенциальных патрубка под углом 120° в горизонтальной плоскости друг к другу, а в верхней части установлен динамический классификатор, в качестве ротора которого используется сепарационная корзина. В процессе исследований решалось две задачи. Первая заключалась в исследовании аэродинамики воздушного потока в сепарационной зоне, вторая – в определении эффективности классификации измельченного продукта. Варьируемыми параметрами принимались скорость и направление вращения ротора сепарационного устройства. Направление вращения задавалось по ходу движения основного газового потока и в противоположную сторону. Его частота изменялась ступенчато и составляла 300 и 600 об/мин, что соответствовало линейной скорости по среднему диаметру ротора 10 и 20 м/с.

Из-за сложности и непредсказуемости распределения скоростей газа в зоне ротора было принято решение прибегнуть к компьютерному моделированию. Причем это реализовывалось в программном комплексе ANSYS CFX. Предварительно в программном комплексе Solid Works был смоделирован помольно-сепарационный агрегат с реальными геометрическими соотношениями. Внутренний диаметр корпуса мельницы – 350 мм, высота мельницы – 550 мм, количество валков – 2, средний диаметр валков – 160 мм,

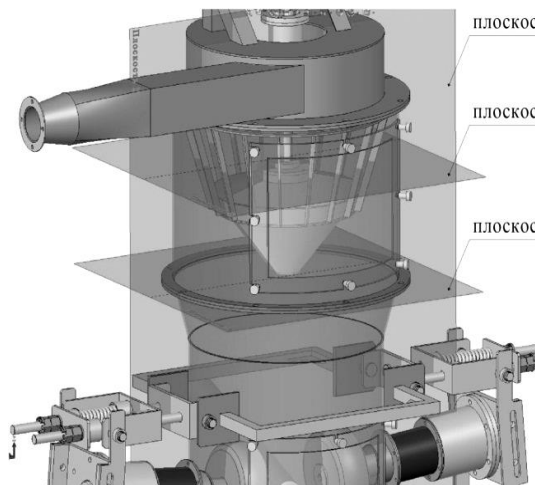


Рис. 1. Рассматриваемые сечения

диаметр размольной тарелки 300 мм, внутренний диаметр корпуса динамического сепаратора – 400 мм, высота – 305 мм, усредненный диаметр ротора 315 мм, высота – 270 мм. В качестве исходных параметров для расчета задавались: частота вращения тарелки – 100 мин⁻¹, массовый расход газа на выходе составлял 0,2 кг/с (т.е. модель компоновки, при которой вентилятор установлен после помольно-сепарационного агрегата), размер твердой фазы при плотности 1800 кг/м³ – 10...100 и 200...1000 мкм.

Аэродинамическая обстановка в зоне сепарации анализировалась в двух горизонтальных плоскостях и одной вертикальной (рис. 1). Плоскость *A* – под корзиной ротора; плоскость *B* – в его центральной части; вертикальная плоскость *B* отсекала корпуса помольного агрегата по оси симметрии. Основным определяемым параметром принято поле скоростей газа в каждом из сечений.

В качестве основной модели для определения полей скоростей газа в программном комплексе ANSYS CFX приняты уравнения Рейнольдса, являющиеся модификацией уравнения Навье – Стокса [5]. Рейнольдс принял допущение, что мгновенную скорость газа U можно представить в виде осредненной по времени скорости \bar{U} и ее турбулентных пульсаций U' :

$$U = \bar{U} + U' . \tag{1}$$

Для решения уравнений Рейнольдса использована полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля, заключающаяся во введении параметра, называемого длиной пути смешения l , на котором постулируется сохранение определенных характеристик турбулентного потока. В результате получена линейная зависимость между турбулентными напряжениями и осредненными скоростями потока. При этом турбулентные напряжения в цилиндрической системе координат выражаются следующим образом [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{rr} = -\rho \cdot \bar{U}'_r{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left(\frac{dU_r}{dr} \right); \\ \tau_{\varphi\varphi} = -\rho \cdot \bar{U}'_\varphi{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{dU_\varphi}{d\varphi} + \frac{U_r}{r} \right); \\ \tau_{zz} = -\rho \cdot \bar{U}'_z{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left(\frac{dU_z}{dz} \right); \\ \tau_{r\varphi} = -\rho \cdot \bar{U}'_r \cdot \bar{U}'_\varphi = \mu_T \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{dU_r}{d\varphi} + \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{U_\varphi}{r} \right); \\ \tau_{rz} = -\rho \cdot \bar{U}'_r \cdot \bar{U}'_z = \mu_T \cdot \left(\frac{dU_r}{dz} + \frac{dU_z}{dr} \right); \\ \tau_{\varphi z} = -\rho \cdot \bar{U}'_\varphi \cdot \bar{U}'_z = \mu_T \cdot \left(\frac{dU_\varphi}{dz} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{d\varphi} \right), \end{array} \right. \tag{2}$$

где μ_T – коэффициент турбулентной вязкости.

Таким образом, появилась возможность турбулентные течения рассматривать как фиктивные ламинарные с неньютоновским коэффициентом вязкости.

Далее для закрученного потока введены следующие допущения: 1) поток в камере ассиметричен и квазистационарен; 2) изменение всех параметров камеры по оси значительно меньше, чем по радиусу; 3) коэффициент молекулярной вязкости μ значительно меньше коэффициента турбулентной вязкости μ_T , причем последний – величина скалярная.

Тогда с учетом этих допущений и уравнений (2) в цилиндрической системе координат уравнение Рейнольдса и неразрывности потока можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_r \cdot \frac{dU_\varphi}{dr} + \frac{U_r \cdot U_\varphi}{r} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left(\frac{d^2 U_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{U_\varphi}{r^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \left(\frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{U_\varphi}{r} \right); \\ U_r \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_\varphi^2}{r} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left(\frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} \right) + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d\rho}{dr}; \\ U_r \cdot \frac{dU_z}{dr} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left(\frac{d^2 U_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{dr} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_z}{dr}; \\ \frac{dU_r}{dr} + \frac{U_r}{r} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Приведенная система уравнений имеет аналитическое решение, а также решается с использованием компьютерных программ. При аналитическом решении вводятся дополнительные обозначения, объединяющие ряд параметров, таких как кинетическая энергия турбулентности на единицу массы k_T , скорость диссипации ε [7]. Эта так называемая « $k_T - \varepsilon$ » модель турбулентности является самой распространенной при анализе аэро- и гидродинамики закрученных течений и использована в программном комплексе ANSYS CFX. Результаты расчетов с помощью программного комплекса ANSYS CFX представлены в виде поля распределения скоростей по всему объему помольно-сепарационного агрегата.

На рисунке 2 показано распределение осевой составляющей скорости газа (плоскость В) при линейной скорости вращения ротора 10 и 20 м/с в разных направлениях.

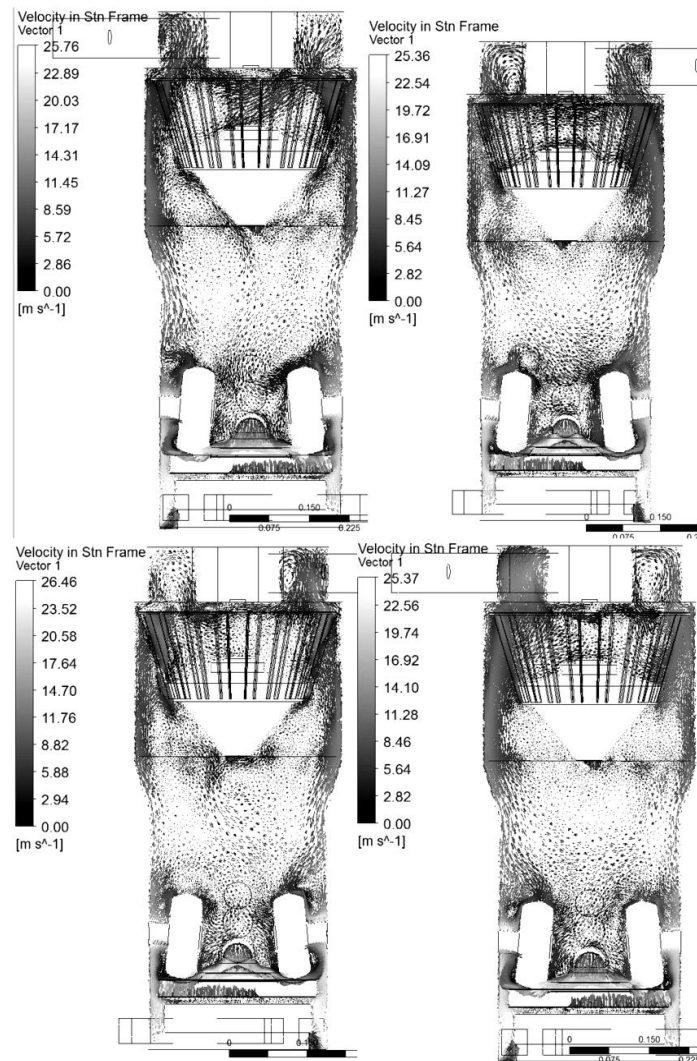


Рис. 2. Распределение осевой составляющей полной скорости газового потока

Видно, что в кольцевом зазоре, образованном торцом размольной тарелки и корпусом мельницы, осевая скорость составляет в среднем около 25 м/с, что достаточно для выноса неизмельченного рассматриваемого материала в сепарационную зону и предотвращения провала. Далее основная часть газового потока движется вблизи стенок помольного агрегата со скоростью 8...10 м/с. На подходе к сепаратору при вращении ротора в попутном направлении поток перераспределяется, равномерно покрывая все сечение. Скорость газового потока при проходе через лопасти корзины и внутри нее стабильна и составляет около 10 м/с. Такая скорость обеспечивает хорошее отделение легких частиц от крупной фракции и удаление их из сепаратора. При встречном вращении ротора за счет создаваемого им подпора скорость газа снижается до 5 м/с, что не позволяет большей доле частиц транспортироваться через лопасти корзины сепаратора. При увеличении скорости вращения ротора до 20 м/с осевая скорость в межлопаточном пространстве ротора динамического сепаратора увеличивается, а по его оси возникают зоны с отсутствием движения газа. Ротор сам становится транспортирующим или препятствующим движению устройством, а не сепаратором. В сечениях с горизонтальными плоскостями *A* и *B* получено распределение суммарной скорости, описываемой уравнением:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_\phi^2 + U_z^2}, \quad (4)$$

где U_r – радиальная составляющая, м/с; U_z – радиальная составляющая, м/с; U_ϕ – тангенциальная составляющая, м/с.

Определяющим критерием для эффективной работы сепаратора является равномерность распределения U на входе в зону сепарации – плоскость *A* (рис. 3). Этому показателю наиболее удовлетворяет сепаратор с попутным вращением, особенно при скорости вращения, равной 10 м/с, где центральная зона низких скоростей минимальна.

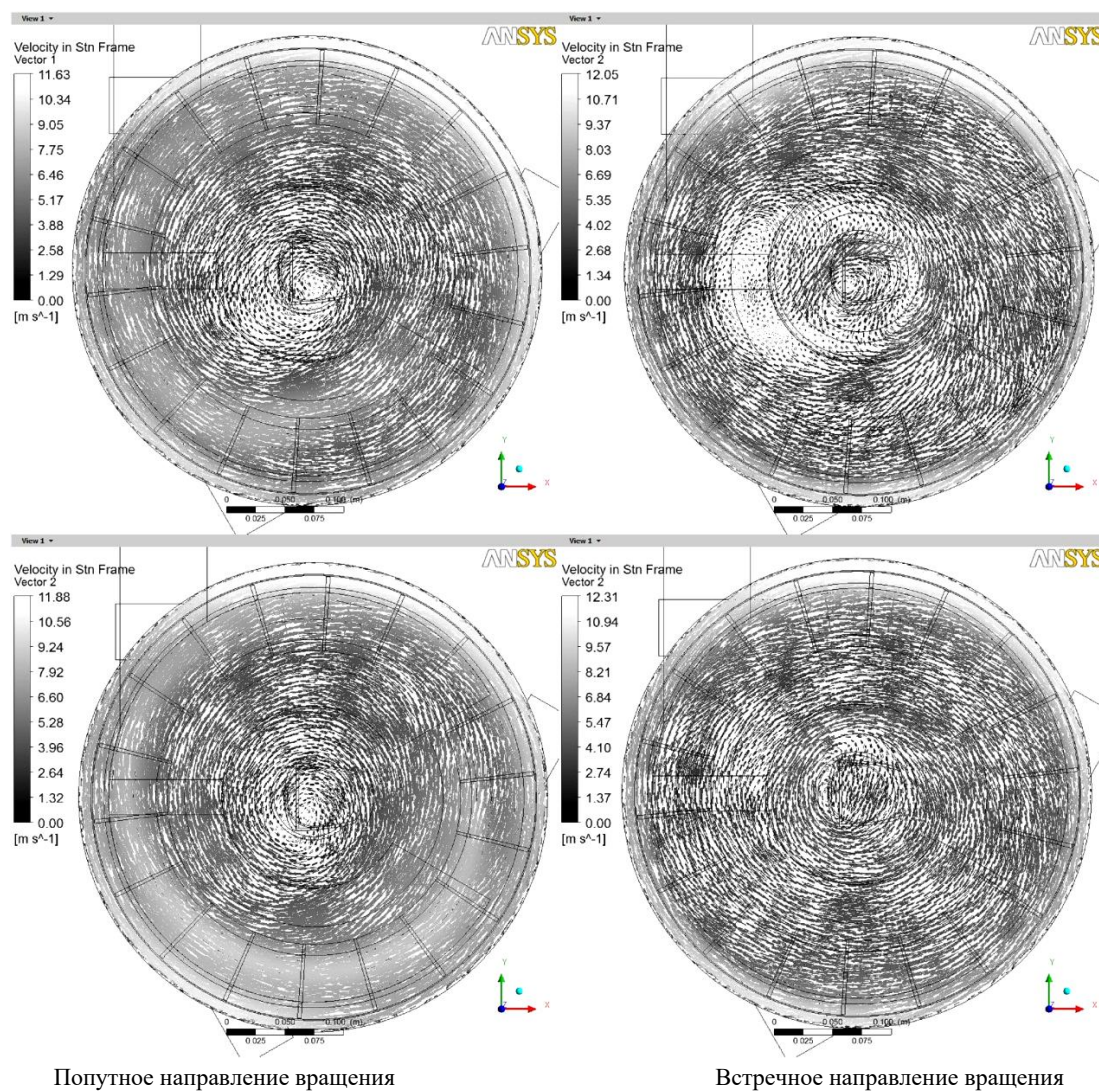


Рис. 3. Распределение полной скорости газового потока в сечении *A*

В плоскости *В*, проходящей через лопасти ротора, наиболее равномерное распределение скорости достигается при попутном вращении, особенно со скоростью 10 м/с (рис. 4, верхняя часть). Причем по периферийной зоне лопастей скорость максимальна (до 8 м/с), что обеспечивает проникновение через лопасти ротора частиц большего размера. При скорости вращения 20 м/с в роторе увеличивается «вентиляторный» эффект, зона высоких скоростей смещается на внутренние кромки лопастей, а снаружи скорость газового потока снижается до 6 м/с. В этом случае сепарируемые частицы будут иметь меньший размер.

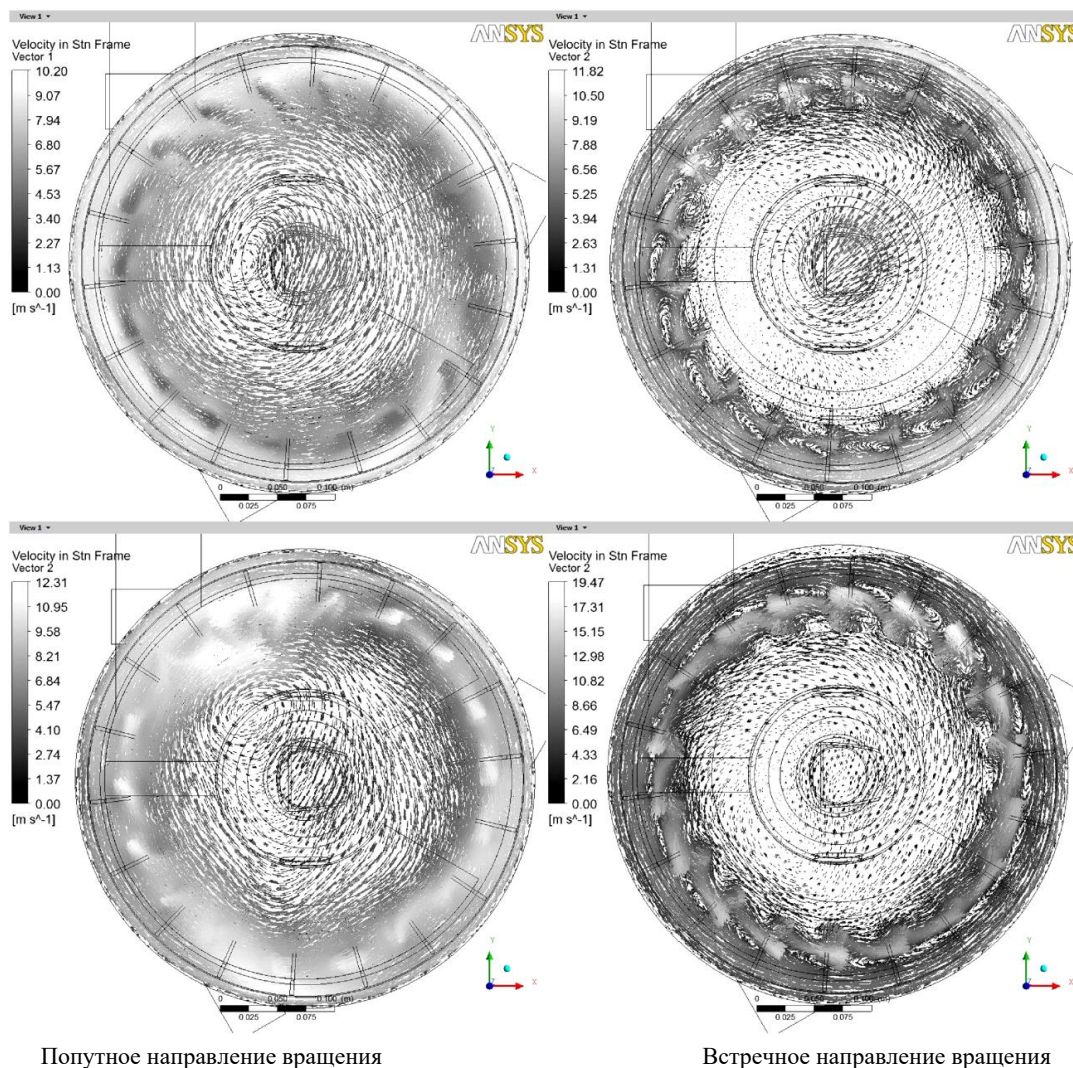


Рис. 4. Распределение полной скорости газового потока в сечении *В*

Полученные графические зависимости составляющих полной скорости лишь дополняют результаты изменения профилей скоростей для анализируемых сечений.

При встречном вращении ротора (см. рис. 4) поток воздуха по сечению распределяется крайне неравномерно. Скорость вращения 10 м/с в принципе обеспечивает такую радиальную составляющую, которая позволит частицам проникнуть в центральное сечение ротора. Однако в зоне вблизи оси симметрии скорость газового потока резко снижается вплоть до нулевых значений. В результате существует вероятность накопления частиц в осевой зоне ротора и их случайного выброса за счет ударного воздействия лопастей без четкой сепарации.

При скорости вращения 20 м/с аэродинамическая ситуация еще более усугубляется тем, что перед внешними кромками лопастей корзины ротора образуется зона с низкой скоростью газового потока. Это препятствует проходу частиц материала между лопастями. Высокоскоростные вихри появляются только непосредственно на тыльной стороне лопастей при огибании их газовым потоком.

Рассмотрим, каким образом распределяются по сечению помольного агрегата составляющие полной скорости аэродинамического потока – осевая, радиальная и тангенциальная. Результаты анализа представлены на рисунке 5 в виде графических зависимостей.

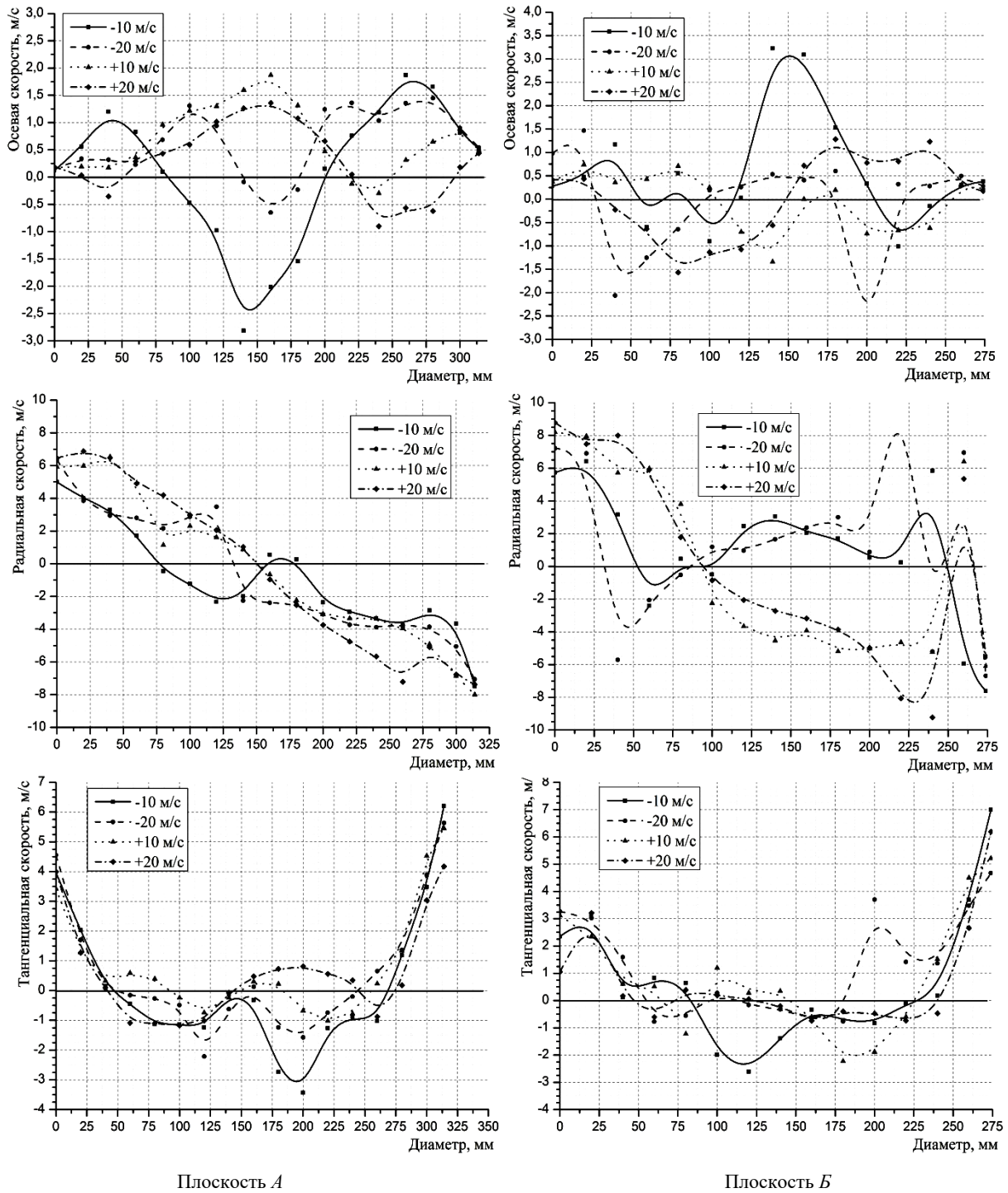


Рис. 5. Распределение составляющих полной скорости воздушного потока

Для рассматриваемых режимов работы помольно-сепарационного агрегата проведен предварительный анализ движения частиц в потоке газа. Параметры движения твердых частиц в общем случае рассчитываются по уравнению:

$$m \cdot \frac{d\bar{U}}{dt} = \Sigma \bar{F}, \tag{5}$$

где $\Sigma \bar{F}$ – сумма всех активных сил.

В качестве активных сил будут выступать сила аэродинамического воздействия и сила тяжести частиц.

Сила аэродинамического воздействия определяется по формуле:

$$\bar{F}_D = k_\phi \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot S}{2} \cdot |\bar{U}_i - \bar{Q}| \cdot (\bar{U}_i - \bar{Q}), \quad (6)$$

где \bar{U}_i – скорость воздушного потока, м/с; \bar{Q} – скорость движения частицы в закрученном потоке, м/с; c – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ – плотность воздуха, кг/м³; S – площадь поперечного сечения частицы, м²; k_ϕ – коэффициент формы частицы.

Модуль разности скоростей воздушного потока и частиц (относительная скорость) определяется следующим образом:

$$\tilde{U} = |\bar{U}_i - \bar{Q}| = \sqrt{(U_r - Q_r)^2 + (U_\phi - Q_\phi)^2 + (U_z - Q_z)^2}. \quad (7)$$

Анализ характера движения частиц различных диаметров от 10 до 100 мкм и от 200 до 1000 мкм проведен при попутном и встречном движении ротора динамического сепаратора со скоростями 10 и 20 м/с. Результаты представлены на рисунке 6 и по своему характеру во многом совпадают с предположениями, сделанными при анализе структуры аэродинамики воздушного потока. При попутном вращении со скоростью 10 м/с происходит эффективное отделение частиц размером от 300 до 1000 мкм.

Увеличение скорости вращения приводит к увеличению эффективности улавливания частицы различных размеров от 60 до 100 мкм.

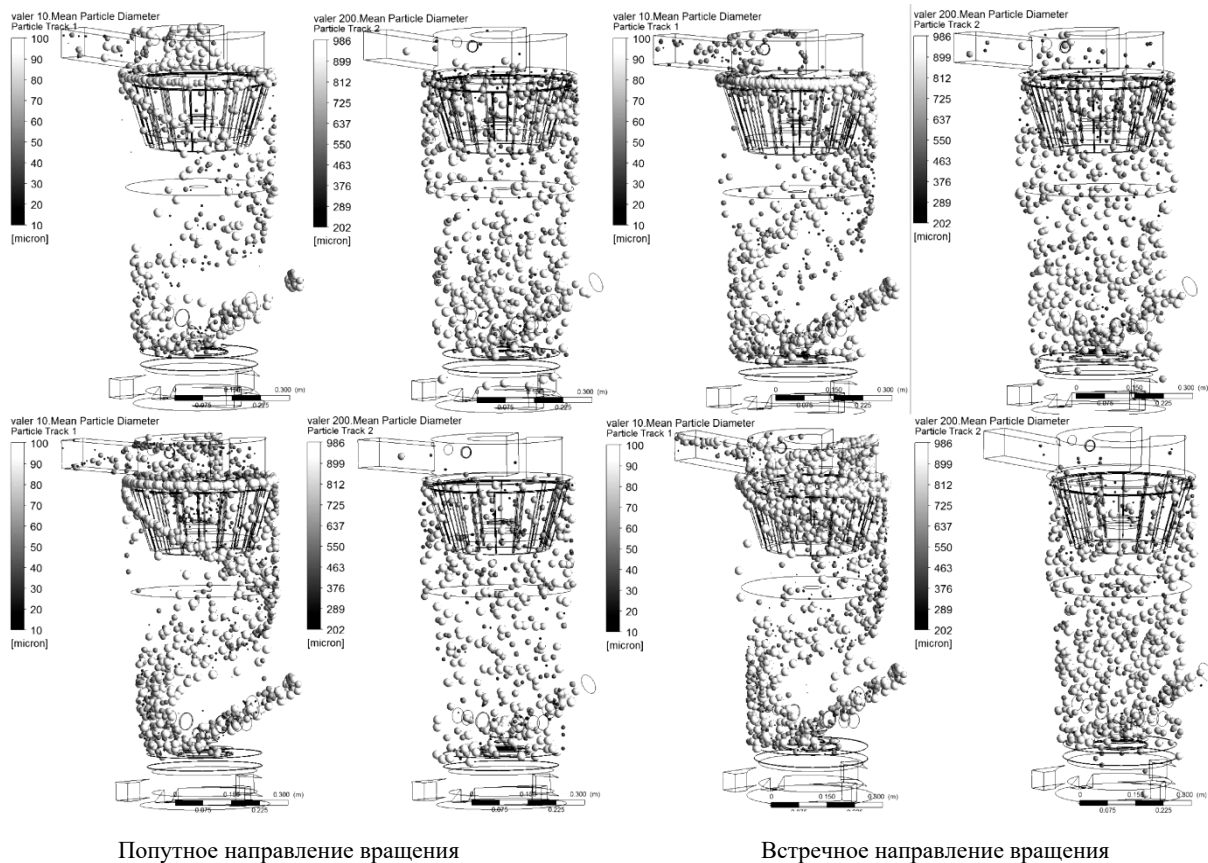


Рис. 6. Движение частиц материала в аэродинамике потока

При встречном вращении ротора со скоростью 10 м/с частицы проходят лопатки корзины внутрь ротора, но за счет снижения скорости газа накапливаются в нем. Отдельные твердые частицы в значительной степени отделяются от общей массы. Однако это отделение хаотичное, преимущественно за счет ударного воздействия лопастей на частицы с последующим выбросом из внутренней зоны ротора. Поэтому эффективность разделения будет низкой. При увеличении скорости вращения до 20 м/с из-за снижения скорости газа в области ротора проникновение внутрь его частиц почти полностью прекращается и, соответственно, эффективность классификации снижается.

Заключение. Применение компьютерного моделирования для исследования различных технологических процессов, в частности аэродинамики, эффективности классификации позволяет с высокой степенью достоверности оценить их параметры, выявить преимущества и недостатки, найти оптимальные решения этих параметров.

На примере сепарационного устройства установлено:

- попутное с основным потоком газовой среды вращение ротора обеспечивает более эффективную классификацию частиц продукта;
- увеличение частоты вращения до определенного значения способствует уменьшению размера фракции. Но по скоростному режиму надо всегда искать оптимальное значение, поскольку возможна ситуация сплошного подвешивания частиц в сепарационной зоне, их накапливания и, как следствие, остановки процесса сепарации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Францкевич, В.С. Моделирование движения частицы материала в кольцевом зазоре валковой среднеходной мельницы / В.С. Францкевич // Весті НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 4. – С. 39 – 43.
2. Вайтехович, П.Е. Энергетика процесса измельчения в мельницах раздавливающего типа / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4. – С. 18 – 21.
3. Францкевич, В.С. Моделирование движения материала в сепарационной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81, № 6. – С. 295 – 300.
4. Францкевич, В.С. Исследование аэродинамики сепарационной зоны вертикальной валковой мельницы / В.С. Францкевич, А.С. Дорогокупец // Строительная наука и техника. – 2009. – № 4. – С. 72 – 75.
5. Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов [и др.]. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
6. Кнорре, Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
7. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лиллей, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.

Поступила 15.04.2013

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE DYNAMIC QUALIFIER ON AERODYNAMICS AND EFFICIENCY OF CLASSIFICATION OF THE CRUSHED PRODUCT IN THE MILL

A. DOROGOKUPETS, P. VAITSEHOVICH, V. FRANTSKEVICH

Research of aerodynamics of the air twirled spatial stream in section of the unit including a mill and a dynamic qualifier by means of computer modelling is considered. Illustrative laws of distribution of a profile of speeds in horizontal and vertical sections are presented. Efficiency of classification of a product is shown at various speeds of rotation of a basket of a dynamic separator. It is established that passing with the basic stream of the gas environment of rotation of a rotor provides a more effective classification of the crushed product.

УДК 658.512

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРЦОВОЙ ФРЕЗЫ НА РАЗМЕРЫ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ И ВИД ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*канд. техн. наук, доц. М.И. МИХАЙЛОВ, О.А. ЛАПКО
(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)*

Разработана математическая модель траектории результирующего движения зубьев фрезы, позволяющая учитывать погрешность позиционирования сменных многогранных пластин в корпусе фрезы. Определено влияние радиального биения зубьев фрезы на максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости. Установлено, что наибольшее влияние на максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости оказывает случай одиночного радиального биения зуба. Выявлено наиболее рациональное (тангенциальное) расположение сменных многогранных пластин в корпусе фрезы.

Введение. Современное машиностроение характеризуется повышением требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей – точности получаемых размеров, отклонений формы, взаимного расположения поверхностей, их волнистости и шероховатости. Именно эти параметры определяют контактные деформации и жесткость стыков, характеризуют трение и износ поверхностей, герметичность соединений, прочность сцепления с покрытием и т.п. При этом необходимо обеспечить не только заданные требования качества поверхности, но и их стабильность, которая определяется характеристиками параметров геометрии поверхности детали, задаваемыми законом их распределения.

Геометрия поверхности детали определяется ее топографией. Математическое описание формирования топографии поверхности при механической обработке затрудняется большим количеством влияющих на нее параметров. Ситуация еще более усложняется тем, что случайные отклонения могут иметь динамический характер. При этом эмпирические рекомендации позволяют разрешить только отдельные из возникающих проблем, для которых эти эмпирические данные существуют.

Математическое моделирование операций механической обработки по сравнению с экспериментальными исследованиями позволяет получать большее количество информации и сократить время на исследования. Эти преимущества приводят к широкому внедрению моделирования в технологические расчеты. Однако разнородность существующих моделей технологических систем и процессов, а также отсутствие единого подхода к их разработке значительно затрудняет внедрение этих моделей.

Так, С.Л. Леонов и В.Н. Некрасов используют метод математического моделирования при формировании топографии поверхности торцовым фрезерованием, при этом они представляли этот процесс в виде «черного ящика» [1 – 3].

Кроме того, топография обработанных поверхностей зависит от расположения формообразующей кромки фрезы в корпусе инструмента и траектории ее движения, на которую в свою очередь влияют параметры режима резания и геометрические параметры режущих кромок фрезы.

Расчетная модель и экспериментальные исследования. Для описания траектории точки зуба фрезы при обработке были получены следующие уравнения:

$$x = \frac{S_0}{2\pi} \cdot t \pm \frac{D}{2} \cdot \sin\left(t \pm k \cdot \frac{\pi}{n}\right); \quad (1)$$

$$x = \frac{S_0}{2\pi} \cdot t \pm \frac{D}{2} \cdot \cos\left(t \pm k \cdot \frac{\pi}{n}\right), \quad (2)$$

где S_0 – подача на один цикл главного движения инструмента, мм/об; D – диаметр фрезы, мм; t – центральный угол поворота рассматриваемой точки кромки фрезы; k, n – целые числа.

В качестве режущих элементов сборного механизированного инструмента наиболее часто используются сменные многогранные пластины (СМП), которые нашли широкое применение в промышленности (пластины формы 02114). Параметры формы и расположение их базовых поверхностей оказывают наибольшее влияние на радиальное и осевое биение режущих кромок инструмента.

В проведенных исследованиях определялось влияние на точность позиционирования СМП в корпусе инструмента отклонений от плоскостности базовых граней.

Исследование плоскостности опорных граней пластин производилось по результатам измерения отклонений их реальных поверхностей от прилегающих плоскостей. По результатам измерений были построены гистограммы распределения значений отклонений от прилегающей плоскости каждой эле-

ментарной площадки. Так, на опорной поверхности было выделено 215 элементарных площадок, для которых были построены гистограммы распределения значений отклонений от плоскостности. Все гистограммы были разделены на шесть групп по их виду. Типовые гистограммы распределения значений отклонений от плоскостности каждой группы представлены на рисунке 1.

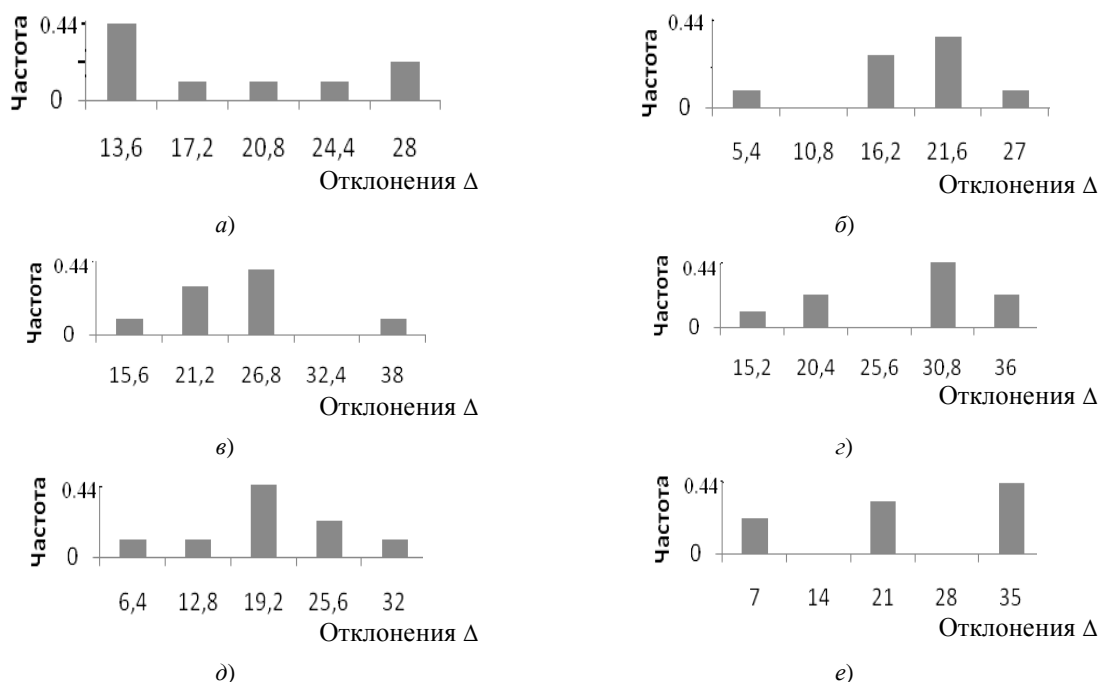


Рис. 1. Типовые гистограммы распределения значений отклонений от прилегающей плоскости

По приведенным гистограммам с заданной вероятностью 0,11; 0,22; 0,33; 0,44 определялись максимальное, минимальное и рассчитывалось среднее значения отклонений от плоскостности.

Для 1-й группы гистограмм (рис. 1, а): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности не превышало 10 мкм, максимальное – 28 мкм, а среднее – 19; при вероятности 0,22 соответственно 10; 28; и 19; при вероятности 0,33 – 10; 13,6; 5,8; при вероятности 0,44 – 10; 13,6; 5,8. Количество гистограмм 1-й группы составляло 9 % от общего числа.

Для 2-й группы гистограмм (рис. 1, б): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности равно 5,4 мкм; максимальное – 27; среднее – 16,2; при вероятности 0,22 соответственно – 10,8; 21,6; 16,2; при вероятности 0,33 – 10,8; 21,6; 16,2; при вероятности 0,44 – 16,2; 21,6; 18,9. Количество гистограмм 2-й группы составляло 24 % от общего числа.

Для 3-й группы гистограмм (рис. 1, в): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности равно 10 мкм; максимальное – 38; среднее – 24; при вероятности 0,22 соответственно – 15,6; 26,8; 21,2; при вероятности 0,33 – 15,6; 26,8; 21,2; при вероятности 0,44 – 21,2; 26,8; 24. Количество гистограмм 3-й группы составляет 26 % от общего числа.

Для 4-й группы гистограмм (рис. 1, г): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности равно 10 мкм; максимальное – 36; а среднее – 23; при вероятности 0,22 соответственно – 15,2; 36; 25,6; при вероятности 0,33 – 25,6; 30,8; 28,2; при вероятности 0,44 – 25,6; 30,8; 28,2. Количество гистограмм 4-й группы составляет 19 % от общего числа.

Для 5-й группы гистограмм (рис. 1, д): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности равно 6,4 мкм; максимальное 32; среднее – 9,2; при вероятности 0,22 соответственно – 12,8; 25,6; 19,2; при вероятности 0,33 – 19,2; 25,6; 22,4; при вероятности 0,44 – 19,2; 25,6; 22,4. Количество гистограмм 5-й группы составляет 12 % от общего числа.

Для 6-й группы гистограмм (рис. 1, е): при вероятности 0,11 минимальное значение отклонений от плоскостности равно 0; максимальное 35 мкм; а среднее – 17,5; при вероятности 0,22 соответственно 0; 35; 17,5; при вероятности 0,33 – 14; 35; 24,5; при вероятности 0,44 – 28; 35; 30. Количество гистограмм 6-й группы составляет 10 % от общего числа.

При базировании на опорную и боковые поверхности СМП были использованы математические модели точности ее позиционирования в корпусе инструмента, построенные на основе базовых плоскостей и кинематических микроперемещений [5; 6].

Результаты расчетов по полученным моделям приведены в таблице.

Точность позиционирования при заданных вероятностях

Уровни вероятности	δ_{\min} , МКМ	δ_{\max} , МКМ	$\delta_{\text{среднее}}$, МКМ
0,11	21	48	34,5
0,22	21	48	34,5
0,33	29	48	38,5
0,44	35	48	41,5

Анализ результатов. Анализ обработанных поверхностей производили по виду траектории движения зубьев фрезы, с параметрами: $S_0 = 0,8$ мм/об; $D = 70$ мм; $Z = 4$.

По вышеприведенным уравнениям (1); (2) были построены траектории зубьев фрезы для случая, при котором они не имели биения (рис. 2). В результате расчетов были определены отклонения топографии поверхности от прилегающей плоскости, максимальное значение которых составило 0,14 мкм.

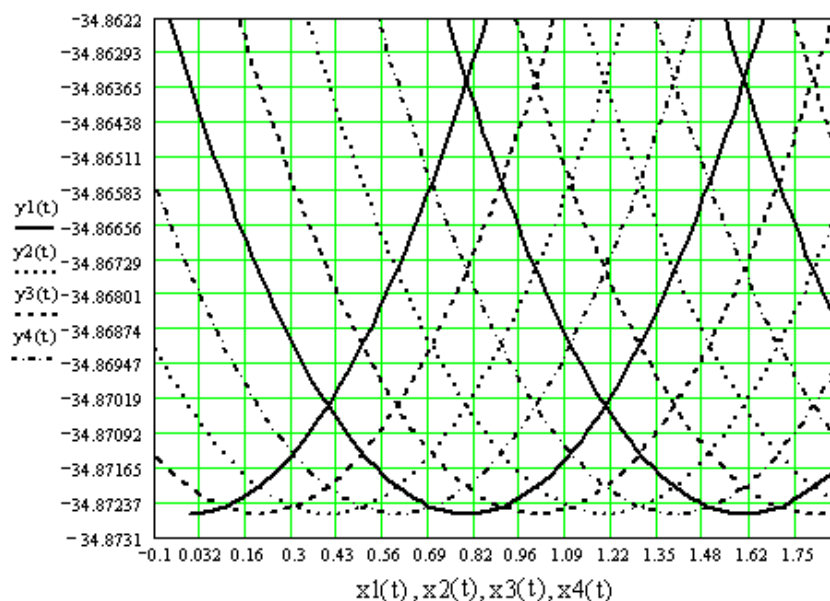


Рис. 2. Траектория зубьев фрезы без учета биения

Траектория зубьев фрезы, у которой один зуб имел радиальное биение +20 мкм (соответствующие погрешности позиционирования, см. таблицу), представлена на рисунке 3.

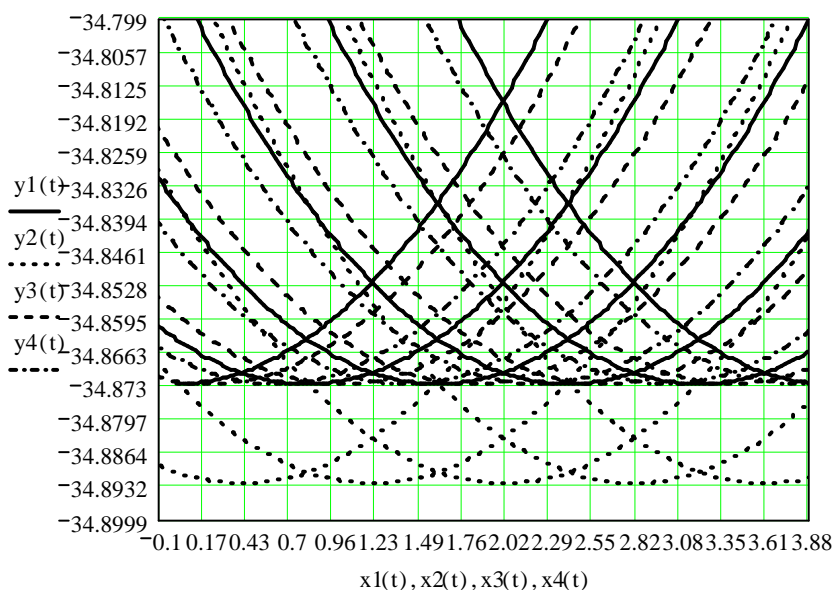


Рис. 3. Траектория зубьев фрезы с биением одного зуба +20 мкм

Расчеты показали, что максимальное значение высоты отклонения топографии поверхности от прилегающей плоскости увеличилось в 16 раз по сравнению с предыдущим вариантом. Для варианта, в котором три зуба имели радиальное биение -20 мкм, максимальное значение высоты отклонения топографии поверхности от прилегающей плоскости равнялось $2,35$ мкм.

Затем рассматривали вариант, в котором фреза имела один зуб с биением -20 мкм (рис. 4). В этом случае максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости составило $0,576$ мкм.

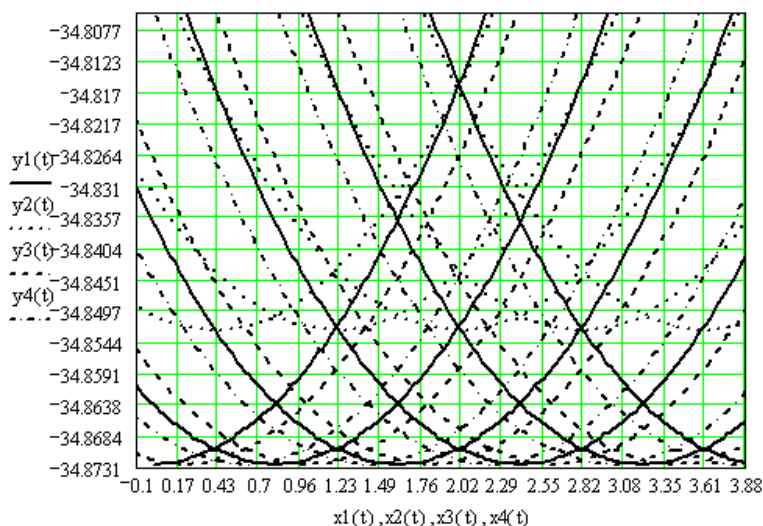


Рис. 4. Траектория зубьев фрезы с биением одного зуба -20 мкм

Результаты этого варианта аналогичны варианту, в котором три зуба имеют биение $+20$ мкм.

В четвертом расчетном варианте два рядом стоящих зуба имели биение $+20$ мкм (рис. 5). В результате максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости составило $1,288$ мкм.

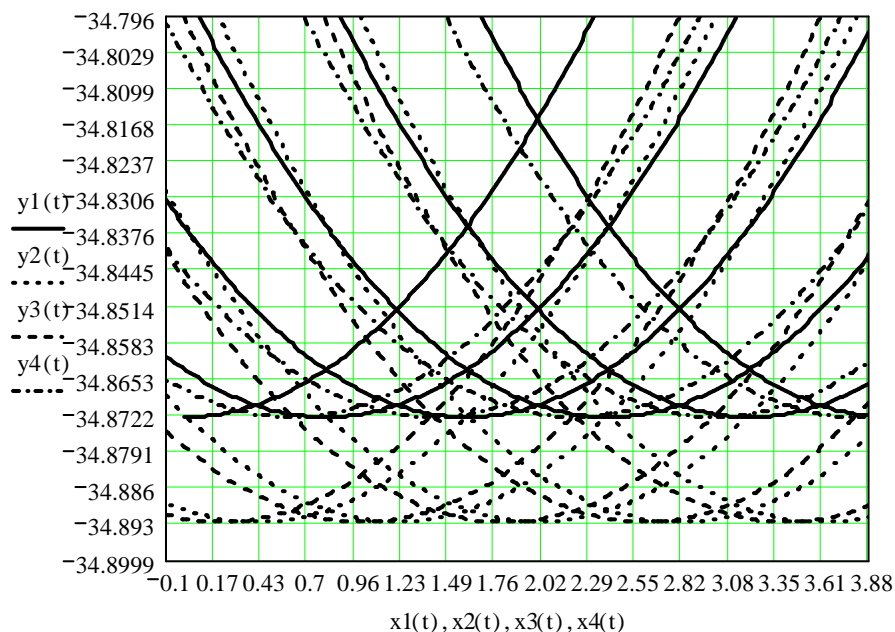


Рис. 5. Траектория зубьев фрезы:
два рядом стоящих зуба имеют биение $+20$ мкм

Следующий рассмотренный вариант – два рядом стоящих зуба имеют биение -20 мкм. Максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости составило $1,3$ мкм. Этот вариант практически аналогичен тому, в котором два других зуба имеют биение $+20$ мкм.

В случае если два не рядом стоящие зуба имели биение +20 мкм, а один зуб между ними не имел погрешности, максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости было равно 0,446 мкм (рис. 6).

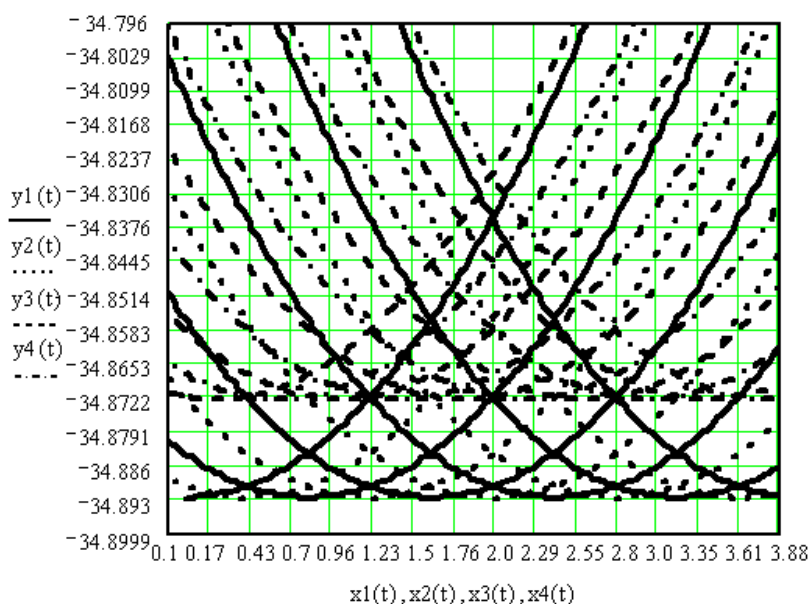


Рис. 6. Траектория зубьев фрезы:
два смежных зуба имеют биение +20 мкм

Кроме того, было исследовано влияние параметров фрезы на толщину срезаемого слоя. Результаты расчетов позволили определить толщину срезаемого слоя в зависимости от угла поворота зуба фрезы и радиального биения зубьев:

$$a_{\max} = S_z \cdot \sin(Q), \quad (3)$$

где S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; Q – угол поворота зуба фрезы.

Расчетные значения изменения толщины срезаемого слоя представлены на рисунке 7.

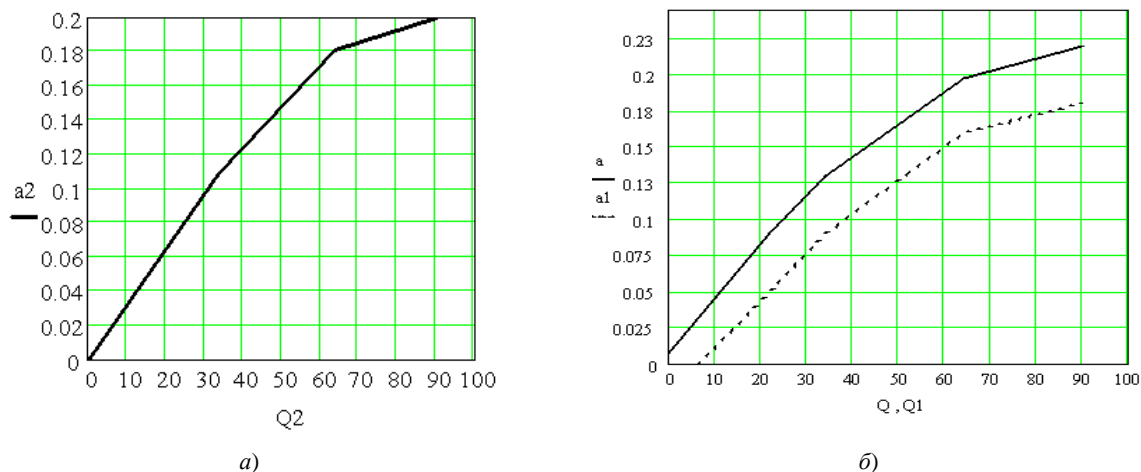


Рис. 7. Зависимость толщины срезаемого слоя от угла поворота фрезы:
 a – без биения зубьев; b – с биением одного зуба

Данные рисунка 7 позволяют заключить, что при увеличении угла поворота фрезы в 9 раз толщина срезаемого слоя увеличивается в 6,6 раза (рис. 7, a). Сравнивая два графика на рисунке 7, b , можно заключить, что толщина срезаемого слоя при одном и том же угле поворота зуба фрезы, например, $Q = 10$, у фрезы с биением зубьев больше на 0,0315 мм, а при $Q = 90$ – на 0,04 мм.

Заключение. В результате проведенного исследования разработана математическая модель траектории результирующего движения зубьев фрезы, позволяющая учитывать погрешность позиционирования СМП в корпусе фрезы. Определено влияние радиального биения зубьев фрезы на максимальное значение высоты отклонения топографии поверхности от прилегающей плоскости.

Сравнивая с типовым методом определения шероховатости, при условии, если один зуб имеет радиальное биение 20 мкм, получили, что значение шероховатости отличается в 1,3 раза.

Сравнивая с типовым методом определения толщины срезаемого слоя, не учитывая радиальное биение, получили, что значение толщины срезаемого слоя отличается в 1,05 раза.

Установлено, что наибольшее влияние на максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости оказывает случай одиночного радиального биения зуба.

Выявлено, что наиболее рациональным расположением СМП в корпусе фрезы является тангенциальное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов, С.Л. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования / С.Л. Леонов, А.Т. Некрасов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – 198 с.
2. Леонов, С.Л. Конструирование моделей для расчета шероховатости и топографии обработанных поверхностей / С.Л. Леонов, Е.Ю. Хоменко // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1 – 2. – С. 170 – 174.
3. Леонов, С.Л. Обеспечение требуемого микрорельефа поверхности при фрезерной обработке основы для нанесения покрытия / С.Л. Леонов // Обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 4 – 7.
4. Михайлов, М.И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М.И. Михайлов; под ред. Ю.М. Плескачевского. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – 339 с.
5. Михайлов, М.И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования / М.И. Михайлов // Машиностроение: сб. науч. тр. – Минск, 2000. – Вып. 16. – С. 125 – 132.
6. Михайлов, М.И. Моделирование точности сборного механизированного инструмента / М. И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. МНТК. – Гомель, 2006. – С. 88 – 89.

Поступила 21.03.2013

THE INFLUENCE OF THE FACE MILL PARAMETERS ON THE DIMENSIONS OF THE LAYER CUT AND THE FORM OF THE SURFACE WORKED

M. MICHAILOV, O. LAPKO

The mathematical model of the trajectory of resulting motion of the mill teeth enabling to allow for the error of positioning the replaceable indexable insert in the mill body is developed. The influence of radial runout of the mill teeth on the maximum value of deviation of the surface topography height from superimposed plane is determined. It is established that maximum influence on maximum value of deviation of the surface topography height from superimposed plane is observed in the case of single radial runout of the tooth. It is established that most efficient positioning of the replaceable indexable insert in the mill body is tangential.

УДК 621:677.024.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИВОДА С УЧЕТОМ ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЕДОМОГО ЗВЕНА

канд. техн. наук, доц. **О.Я. СЕДЕЛЬ**
(Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина)

Рассматривается вопрос оптимизации параметров мощности дифференциального привода с учетом диапазона регулирования скорости ведомого звена. В работе представлен анализ дифференциальных приводов для регулирования технологического процесса с учетом диапазона регулируемых скоростей и оптимальных параметров электродвигателя, используемого в дифференциальном механизме. В качестве примера использования данного привода может быть рассмотрено регулирование технологического процесса на ткацких автоматических станках.

Введение. Основной задачей синтеза дифференциальных приводов является выбор рационального передаточного отношения, которое определяет габариты передачи, обеспечивает диапазон регулируемых скоростей между ведущими звеньями дифференциала.

При выборе рабочей зоны работы электродвигателя с нереверсивным движением необходимо иметь в виду, что широкий диапазон изменения частоты вращения электродвигателя приводит к значительному снижению мощности двигателя при его работе на низких частотах вращения. Поэтому, с одной стороны, диапазон регулируемых электродвигателем скоростей целесообразно иметь значительный, что позволит повысить чувствительность и точность регулирования технологического процесса, а с другой стороны, обеспечить его силовые характеристики. Окончательный выбор структуры дифференциала производится с учетом распределения моментов между основными звеньями дифференциала.

Основная часть. Рассмотрим зависимость между мощностями ведущих звеньев дифференциального привода и диапазоном регулирования частоты вращения ведомого звена дифференциала.

На рисунке 1 представлена схема относительного движения звеньев и направление действия моментов в дифференциальном механизме с управляемым водилом дифференциала.

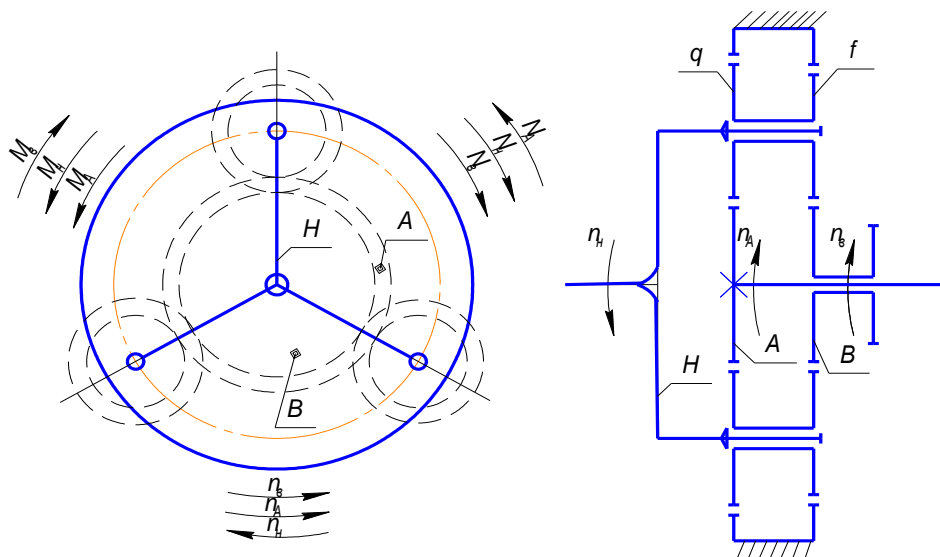


Рис. 1. Схема движения звеньев дифференциального механизма

Распределение моментов и мощностей в дифференциальном приводе при установившемся движении определяется по следующему уравнению [1]:

$$M_A + M_H + M_B = 0, \quad (1)$$

где M_A , M_H , M_B – моменты на центральных колесах A , B и водиле H .

Если известны величина и направление момента, действующего на одно из центральных колес, то без учета потерь на трение моменты, действующие на другие звенья механизма, определяются следующим образом [1]:

$$-M_H / M_B = 1 / i_{HB}^A; \quad -M_A / M_B = 1 / i_{AB}^H, \quad (2)$$

или так как $1/i_{HB}^A = (1 - i_{BA}^H)$ и $1/i_{AB}^H = i_{BA}^H$,
то

$$M_H = -M_B(1 - i_{BA}^H); M_A = -M_B i_{BA}^H. \quad (3)$$

Для решения вопроса о распределении мощности в дифференциальном приводе необходимо определить направление действующих в передаче моментов. Схема движения звеньев дифференциального привода с управляемой скоростью водила представлена на рисунке 1.

Для того чтобы узнать, какое из звеньев H или B является ведущим в движении относительно центрального колеса A , надо определить знак φ_H и φ_B по уравнениям [2]:

$$\varphi_H = N_H^A / N_H = M_H(n_H - n_A) / M_H n_H = 1 - i_{AH}^B = 1 - (1 - i_{AB}^H) = i_{AB}^H; \quad (4)$$

$$\varphi_B = N_B^A / N_B = M_B(n_B - n_A) / M_B n_B = 1 - i_{AB}^H; \quad (5)$$

где φ_H, φ_B – отношение мощности водила и колеса в относительном и абсолютном движении; N_H^A и N_B^A – мощности в зацеплении; i_{AB}^H – передаточное отношение в дифференциале.

При $i_{AB}^H = Z_B / Z_f \cdot Z_q / Z_A = 30/21 \cdot 24/27 = 1,269$; $\varphi_H = 1,269$; $\varphi_B = 1 - 1,269 = -0,269$.

Таким образом, $\varphi_H > 0$, а $\varphi_B < 0$.

Так как в дифференциальном приводе принимается ведущим звено A , то $M_A > 0$, а величину и направление моментов в этом случае определим следующим образом:

$$-M_H / M_B = 1/i_{HB}^A; -M_A / M_B = 1/i_{AB}^H, \text{ или}$$

$$M_H = -M_B(1/i_{HB}^A) = -M_B(1 - 0,787) = -0,212M_B; \quad (6)$$

$$M_A = -M_B(1/i_{AB}^H) = -M_B(1/1,269) = -0,788M_B. \quad (7)$$

Направление момента M_A и M_H не совпадает с направлением момента M_B , т.е. момент M_A и M_H является ведущим, а момент M_B ведомым.

Потребная мощность в дифференциальном приводе определяется уравнениями:

$$N_A = M_A \omega_A; N_H = M_H \omega_H; N_B = M_B \omega_B. \quad (8)$$

Направление вращения звеньев и моментов в дифференциальном приводе представлено на рисунке 1. Закон сохранения энергии для дифференциального привода можно записать:

$$M_A \omega_A + (-M_B) \omega_B + M_H(-\omega_H) = N_A - N_B - N_H = 0. \quad (9)$$

Угловая частота вращения звеньев дифференциала по аналогии с уравнением скоростей и с учетом направления вращения ведущих звеньев A и H выразится:

$$\begin{aligned} \omega_B &= -(1 - i_0) \cdot \omega_H + i_0 \omega_A; \\ \omega_H &= (i_0 \omega_A - \omega_B) / (1 - i_0); \\ \omega_A &= [\omega_B + (1 - i_0) \cdot \omega_H] / i_0. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом уравнений (2), (8), (10) мощности ведомых и ведущих звеньев дифференциального привода, выраженные через M_B , будут равны:

$$\begin{aligned} N_A^{\max} &= M_B^{\max} i_0 \left\{ \left[\omega_B^{\text{pac. min}} + (1 - i_0) \omega_H' \right] / i_0 \right\}; \\ N_B^{\max} &= -M_B^{\max} i_0 \left[i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H' \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$N_H^{\max} = -M_B^{\max} (1 - i_0) \left[-(i_0 \omega_A - \omega_B^{\text{pac. min}}) / (1 - i_0) \right].$$

Соответственно для минимальной мощности на ведомых и ведущих звеньях

$$\begin{aligned} N_A^{\min} &= -M_B^{\min} i_0 \left\{ \left[\omega_B^{\text{pac. max}} + (1 - i_0) \omega_H'' \right] / i_0 \right\}; \\ N_B^{\min} &= -M_B^{\min} i_0 \left[i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H'' \right]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$N_H^{\min} = -M_B^{\min} (1 - i_0) \left[-(i_0 \omega_A - \omega_B^{\text{pac. max}}) / (1 - i_0) \right]. \quad (13)$$

Определим зависимость распределения мощности в приводе с учетом передаточного отношения для данной структуры дифференциала.

Регулируемая частота вращения водила ω_H с учетом ω_B^{\min} и ω_B^{\max} и направление вращения ведущих звеньев определим из уравнения (10).

Для начальных параметров $\omega_B^{\max} = 143 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_B^{\min} = 52,4 \text{ с}^{-1}$; $M_B^{\min} = 64 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_B^{\max} = 104,7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_A = 151,84 \text{ с}^{-1}$ выполнен расчет потребной мощности привода при различных значениях передаточного отношения дифференциала по уравнениям (11), (12), которые представлены на рисунке 2.

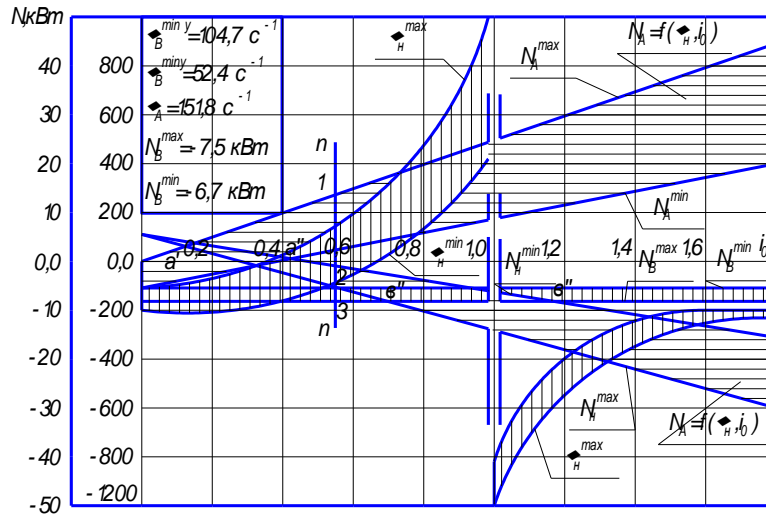


Рис. 2. Мощность дифференциального привода с ведущим водилом H при различных передаточных отношениях дифференциала

В заданном интервале передаточных отношений дифференциала i_0 диапазон угловых скоростей водила H ограничивается кривыми ω_H^{\max} , ω_H^{\min} во встречном и попутном вращении по отношению центрального колеса A . При этом на преодоление полезной работы на ведомом колесе B расход мощности ведущих звеньев H и A , связанных соответственно с управляемым электродвигателем постоянного тока, неоднозначный.

Пределы потребляемой мощности на ведущих звеньях N_A и N_H представлены диапазонами, для которых характерно то, что в любом сечении $n - n$ выполняется баланс мощности, как это показано на рисунке 2.

Такое же равенство баланса мощностей получается в любом рассматриваемом сечении. Разница лишь в том, что при передаточных отношениях $i_0 \ll 1$ для преодоления полезной работы потребная мощность ведущих звеньев меньше, чем при отношениях дифференциала $i_0 > 1$.

Так, в сечении « $n - n$ » справедливо равенство, получаемое проектированием точек пересечений линий « $n - n$ » с прямыми N_A^{\max} , N_H^{\max} и N_B^{\max} или N_A^{\min} , N_H^{\min} и N_B^{\min} на ось N :

$$N_B^{\max} = N_A^{\max} + N_H^{\max}; -7,5 = 13,03 - 5,53.$$

Кроме того, при $i_0 \leq 0,2$ основная мощность отбирается от двигателя постоянного тока, а при $i_0 > 0,2$ от двигателя переменного тока.

С увеличением передаточного отношения i_0 мощность электродвигателя постоянного тока (водило H) переходит из ведущей $+N_H$ в ведомую мощность.

Аналогичная картина наблюдается и для минимальной мощности звеньев, но лишь при других передаточных отношениях.

На графиках имеются особые точки a и b , в которых пересекаются прямые N_H и N_A , N_B .

Точка a' – точка пересечения прямой N_H и N_A , точка b' – точка пересечения прямой N_H и N_B .

Соответственно, для точки a' можно установить, что полезная мощность N_B , преодолеваемая равными долями от ведущих звеньев A и H , будет следующей:

$$-N_B = 0,5N_H + 0,5N_A; -7,5 \text{ кВт} = 3,75 \text{ кВт} + 3,75 \text{ кВт}.$$

Для точки b' характерно равенство $-N_B = -N_H$, и баланс мощностей в этом случае запишется так:

$$-7,5 \text{ кВт} = -7,5 \text{ кВт} + 15 \text{ кВт}, \text{ где } N_A = 15 \text{ кВт}.$$

Исследуем случай, когда электродвигатель постоянного тока, связанный с водилом H , может быть взят минимальной мощности, т.е. $N_H \Rightarrow 0$.

Для этого установим связь между мощностью водила и передаточным отношением дифференциала i_0 привода: $N_H = M_H \omega_H$.

Подставив вместо M_H и ω_H значения из уравнения (3), (10) и произведя преобразования, получим:

$$N_H = M_B [(1 - i_0) \cdot (-\omega_H - i_0 \omega_A) / (1 - i_0)] = -N_B + N_B \omega_A i_0; \tag{14}$$

$$N_H = -N_B + N_B (\omega_A / \omega_B) i_0.$$

В уравнении (14), выраженном через мощность ведомого звена N_B , передаточное отношение и угловую скорость ведомого B и ведущего звена A , мощность N_H будет стремиться к минимуму, если множитель при N_B будет равен 1, т.е.

$$(\omega_A / \omega_B) i_0 = 1. \tag{15}$$

Откуда найдем передаточное отношение i_0 , при котором

$$N_H \Rightarrow 0, \text{ т.е. } i_0 = \omega_B / \omega_A.$$

Из уравнения (14) можно также установить зависимость передаточного отношения дифференциала i_0 от мощности и частоты вращения основных звеньев привода:

$$i_0 = \omega_B / \omega_A (1 - N_H / N_B). \tag{16}$$

Аналогично находим условия оптимизации N_H от i_0 и N_A :

$$N_H = M_H \omega_H = M_A [(1 - i_0) / i_0] - [(\omega_H + i_0 \omega_A) / (1 - i_0)],$$

откуда

$$N_H = N_A - N_A (\omega_B / \omega_A) (1 / i_0); \tag{17}$$

$$i_0 = (\omega_B / \omega_A) [1 / (1 - N_H / N_A)].$$

Минимум N_H будет в случае, если в уравнении (17) множитель при N_A будет равен единице, т.е.

$$(\omega_B / \omega_A) (1 / i_0) = 1, \text{ откуда } i_0 = \omega_B / \omega_A. \tag{18}$$

Исходя из того, что угловая скорость ведомого звена изменяется в пределах от ω_B^{\min} до ω_B^{\max} при $\omega_A = \text{const}$, N_A и $N_B = \text{max}$, рассмотрим, как влияет на N_H в балансе мощностей привода передаточное отношение дифференциала i_0 .

Выберем начальные условия: $\omega_B^{\min} = 16,75 \text{ c}^{-1}$; $\omega_B^{\max} = 104,7 \text{ c}^{-1}$; $\omega_A = 151,84 \text{ c}^{-1}$; $N_A^{\max} = 7,5 \text{ кВт}$; $N_B^{\max} = 7,5 \text{ кВт}$; $i_0 = 0 \dots 2$.

Графические зависимости $N_H = f(i, \omega, N)$ представлены на рисунке 3.

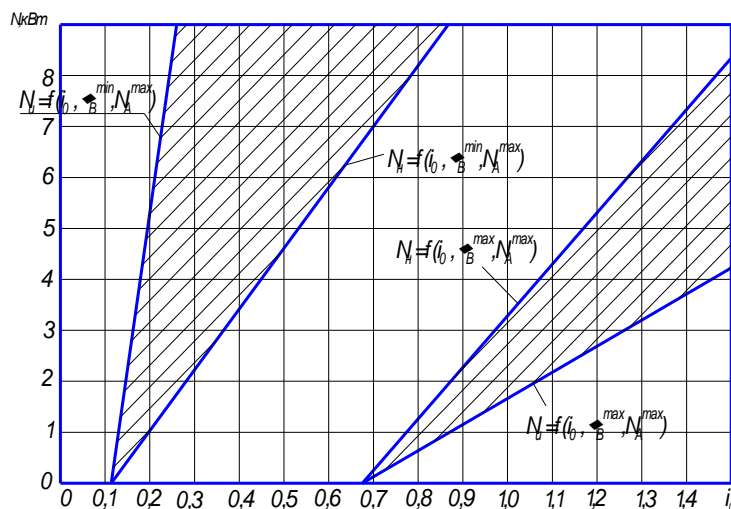


Рис. 3. Графические зависимости мощности на водиле H в функции переменных i_0, ω_B, N_A, N_B

Анализ графиков показывает, что минимальное значение мощности регулируемого электродвигателя постоянного тока будет для минимальной угловой скорости ω_B^{\min} при $i_0 = 0,11$, а для максимальной ω_B^{\max} при $i_0 = 0,689$. Таким образом, в диапазоне регулирования угловых скоростей ведомого звена B от ω_B^{\min} до ω_B^{\max} мощность $N_H \Rightarrow 0$, если выполняется условие по уравнению (18), когда передаточное отношение $i_0 = \omega_B / \omega_A$ в диапазоне рассматриваемых угловых скоростей равно 0,11 и 0,689.

Рассмотрим зависимость между мощностями (R) ведущих звеньев дифференциального привода и диапазоном регулирования частоты вращения ведомого звена дифференциала:

$$R_{\omega_B} = \omega_B^{\max} / \omega_B^{\min} = 6,25. \quad (19)$$

Из уравнения (5) можно записать:

$$\omega_B^{\max} = (\omega_A i_0) / (1 - N_H^{\min} / N_B) \quad \text{при } N_H < N_B; \quad (20)$$

$$\omega_B^{\min} = (\omega_A i_0) / (1 - N_H^{\max} / N_B) \quad \text{при } N_H < N_B. \quad (21)$$

Из уравнения (19), (20) и (21) получим:

$$R_{\omega_B} = (N_B - N_H^{\min}) / (N_B - N_H^{\max}),$$

или

$$R_B = N_A^{\max} / N_A^{\min}. \quad (22)$$

С другой стороны, диапазон регулирования скоростей ведомого звена дифференциального привода можно выразить следующим образом:

$$R_B = \omega_B^{\max} / \omega_B^{\min} = \{ [i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H^{\min}] / [i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H^{\max}] \}. \quad (23)$$

Преобразовав уравнение (23), получим:

$$R_B i_0 (\omega_A + \omega_H^{\max}) - i_0 (\omega_A + \omega_H^{\min}) = R_B \omega_H^{\max} - \omega_H^{\min}. \quad (24)$$

Обозначим: $D_H = \omega_H^{\max} - \omega_H^{\min}$; $\omega_H^{\max} = D_H + \omega_H^{\min}$.

Преобразуя уравнение (24), найдем зависимость для вычисления диапазона частот регулируемого звена (водила), связанного с электродвигателем:

$$D_H = \{ (R_B - 1) [(\omega_A + \omega_H^{\min}) i_0 - \omega_H^{\min}] / [R_B (1 - i_0)] \}, \quad (25)$$

где D_H – ширина интервала регулируемых частот ведущего звена, связанного с управляемым электродвигателем; ω_A , ω_H^{\min} – угловые скорости вращения ведущих звеньев; R_B – диапазон регулирования угловых скоростей ведомого звена дифференциала.

Минимальная угловая скорость водила ω_H^{\min} выбирается с учетом минимально допустимого крутящего момента электродвигателя. Этот параметр устанавливается по паспорту электродвигателя.

С увеличением D_H увеличивается точность регулирования частот ведомого звена.

$$D_H = f(\omega_H^{\min}); \quad D_H = f(i_0); \quad D_H = f(\omega_A); \quad D_H = f(R_B) \quad (26)$$

при постоянных значениях других составляющих величин, входящих в уравнение (25).

Подставляя в уравнение (25) значение R_B из уравнения (23), получим зависимость для D_H в виде кинематических и силовых параметров:

$$D_H = \{ [i_0 (\omega_A + \omega_H^{\min}) - \omega_H^{\min}] \cdot [\omega_B^{\max} / \omega_B^{\min}] - 1 \} / (\omega_B^{\max} / \omega_B^{\min}) (1 - i_0); \quad (27)$$

$$D_H = \{ [i_0 (\omega_A + \omega_H^{\min}) - \omega_H^{\min}] \cdot [N_A^{\max} / N_A^{\min}] - 1 \} / (N_A^{\max} / N_A^{\min}) (1 - i_0), \quad (28)$$

где $N_A = N_B - N_H^{\min}$; $N_A^{\min} = N_B - N_H^{\max}$.

При выборе параметров дифференциального механизма привода необходимо добиться максимальной величины интервала регулируемых частот электродвигателя при минимальной его мощности.

Так как D_H зависит от передаточного отношения дифференциала i_0 и от диапазона регулирования частот выходного звена D_B , то можно записать следующее выражение:

$$D_B = \omega_B^{\max} - \omega_B^{\min} = [i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H]^{\max} - [i_0 \omega_A - (1 - i_0) \omega_H]^{\min} = \\ = (1 - i_0) (\omega_H^{\max} - \omega_H^{\min}), \quad \text{или } D_B = (1 - i_0) (\omega_H^{\max} - \omega_H^{\min}). \quad (29)$$

Выразим из уравнения (29) угловую скорость ω_H^{\min} :

$$\omega_H^{\min} = \omega_H^{\max} - [D_B / (1 - i_0)]. \quad (30)$$

Начальные параметры системы $D_B = \omega_B^{\max} - \omega_B^{\min} = 52,3 \text{ с}^{-1}$.

Электродвигатель постоянного тока с тиристорным приводом имеет максимальную частоту вращения $n^{\max} = 1500 \text{ об/мин}$.

$$\omega_H^{\max} = \pi n / 30 = (3,14 \cdot 1500) / 30 = 157,08 \text{ с}^{-1}.$$

Так как $D_H \Rightarrow \max$, $\omega_H^{\max} = \text{const}$, а $\omega_H^{\min} \Rightarrow \min$, то чтобы добиться максимальной ширины диапазона D_H , необходимо минимизировать ω_H^{\min} в уравнении (28).

Распишем формулу (11) для верхнего предела мощности электродвигателя:

$$\begin{aligned} N_H^{\max} &= -M_B^{\max} (1 - i_0) [- (i_0 \omega_A - \omega_B^{\min}) / (1 - i_0)] = M_B^{\max} (i_0 \omega_A - \omega_B^{\min}) = \\ &= M_B^{\max} \{ i_0 \omega_A - [(1 - i_0) \omega_H^{\min} - i_0 \omega_A] \} = M_B^{\max} [i_0 \omega_A + (1 - i_0) \omega_H^{\min} - i_0 \omega_A] = M_B^{\max} (1 - i_0) \omega_H^{\min}. \end{aligned} \quad (31)$$

При заданном $M_B^{\max} = 134 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в формуле (31) N_H^{\min} будет зависеть только от передаточного отношения i_0 :

$$N_H^{\max} = M_B^{\max} (1 - i_0) \omega_H^{\min} \Rightarrow \min;$$

$$N_H^{\min} = M_B^{\min} (1 - i_0) \omega_H^{\max} \Rightarrow \min. \quad (32)$$

Следовательно, наша задача сводится к минимизации двух функций (31) и (32) и определению такого передаточного отношения i_0 , чтобы N_H^{\min} и ω_H^{\min} были оптимальными. Для нахождения значений функций (31) и (32) протабулируем по $i_0 = 1 \dots 2$ с шагом $\Delta i_{01} = 0,1$ и $\Delta i_{02} = 0,01$.

В результате вычислений определены ω_A^{\min} , N_H^{\max} , N_H^{\min} для каждого передаточного отношения i_0 для данной структуры дифференциала. Оптимальные значения, удовлетворяющие условиям задачи, будут такими: $i_0 = 0,66$; $\omega_H^{\min} = 3,25 \text{ с}^{-1}$; $N_H^{\max} = 7,08 \text{ кВт}$.

Для использования номинальной скорости двигателя необходимо между электродвигателем и водилом H установить дополнительный редуктор.

Заключение. Регулирование технологического процесса на станках – актуальная проблема для выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Особенностью систем регулирования технологических процессов с помощью дифференциальных механизмов является использование простых механических передач с управляемыми электродвигателями малой мощности. Данные механизмы можно использовать в различных механических системах для регулирования скорости производственного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Планетарные передачи: справ. / под ред. В.К. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977.
2. Кирдяшев, Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Ю.Н. Кирдяшев. – Л.: Машиностроение, 1977.
3. Седел, О.Я. Синтез дифференциальных механизмов регулирования технологического процесса на станках / О.Я. Седел // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 24 – 30.

Поступила 29.01.2013

PARAMETER OPTIMIZATION OF DIFFERENTIAL DRIVE BASED SPEED RANGE OF THE DRIVEN MEMBER

O. SEDEL

The issue of optimization of the parameters of capacities of differential drive is considered taking into account the range of regulation of the speed of the driven link. The paper presents the analysis of differential drives for process control given the range of variable speed and optimal parameters of the motor used in the differential gear. As an example of usage of this drive the process of control on weaving automatic machines can be represented.

УДК 622.363.2

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

д-р техн. наук, доц. В.Я. ЩЕРБА

(ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»)

Рассматривается актуальная проблема снижения пылимости и слеживаемости получаемых калийных удобрений путем создания и применения эффективных композиционных материалов. Предлагается в качестве антислеживающих, пылеподавляющих и флотационных реагентов использовать продукты переработки нефти и их композиций. В основу исследований был заложен новый подход к использованию гидрофобных соединений. Разработаны технология и режимы обработки этими реагентами гранул хлорида калия. Проведенные исследования показали, что снижение пылимости и слеживаемости калийных удобрений обеспечивается при меньшем удельном расходе соответствующих материалов по сравнению с применяемой технологией, что имеет важное экономическое значение.

Введение. Современные требования к качеству удобрений предусматривают наряду с другими свойствами их низкую пылимость, высокие влагостойкость и антислеживаемость, обеспечивающие экологические нормы при транспортировании, складировании и использовании. В производстве минеральных удобрений в качестве антислеживающих, пылеподавляющих и флотационных реагентов уже в течение нескольких десятилетий используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Изучается действие различных ПАВ и их смесей при гранулировании удобрений, исследуются различные факторы, влияющие на влагостойкость и физические свойства удобрений. Например, в работах ВНИИ галургии рассмотрены конкретные способы повышения влагостойкости гранул хлорида калия – это снижение пористости материала, омасливание продукта, обработка поверхности гранул некоторыми композициями ПАВ. Предложены для обработки горячих гранул аммонийные соли сильных минеральных кислот.

Наибольшее распространение для устранения слеживаемости калийных удобрений получили соли первичных алифатических аминов [1]. Механизм снижения слеживаемости минеральных удобрений при использовании аминов заключается в формировании гидрофобного покрытия на поверхности частиц, что улучшает водоотталкивающие характеристики; сокращении капиллярного прилипания и точек контакта между частицами; предотвращении зародышеобразования кристаллов.

Изучение физико-химических и механических свойств гранулированных калийных удобрений (влагопоглощение, гидрофобность, динамическая прочность) и их зависимость от концентрации добавок высших алифатических аминов и их солей позволило установить, что в течение определенного времени такие добавки уменьшают водопоглощение и способствуют повышению гидрофобизации и динамической прочности калийных удобрений аминов [2]. Однако по истечении этого времени происходит разрушение гранул удобрения и повышение водопоглощения в условиях перепада температур и высокой относительной влажности воздуха.

В качестве катионных ПАВ также используют диамины индивидуально либо с добавками алифатических кислот, полиэтиленгликоли, четвертичные амины и оксиэтилированные жирные кислоты, оксиэтилированный моноамин. Для устранения слеживаемости рекомендуется использовать вторичные амины, производные триазина и алкилморфолины. Как недостаток отмечается их повышенный расход и более низкий модифицирующий эффект по сравнению с алифатическими аминами.

Из анионных ПАВ для устранения слеживаемости используют: первичные алкилсульфаты, алкилсульфонаты, нефтяные сульфокислоты, алкилароматические сульфонаты, натриевую соль сульфоянтарной кислоты, сульфаминовую кислоту. Для повышения эффективности алкиларилсульфонатов добавляют соли фосфорной кислоты. Алкиларилсульфонаты гидрофобизируют поверхность частиц удобрения и уменьшают предел прочности связи между частицами. В качестве кондиционирующей добавки для уменьшения слеживаемости калийных удобрений были опробованы соли алкилбензолсульфокислоты при расходе от 200 до 300 г на 1 т готового продукта. Модификатор наносится на охлажденные калийные удобрения. Алкилсульфаты натрия и карбоновой кислоты обладают примерно одинаковым с алифатическими аминами антислеживающим действием, но значительно меньшим модифицирующим эффектом.

Применение в качестве гидрофобизатора продукта обработки нефтяных углеводородов. При кондиционировании минеральных удобрений «контакта Петрова» в качестве гидрофобизатора применяют продукт обработки нефтяных углеводородов серной кислотой с последующей нейтрализацией аммиаком и карбонатом, оксидом или гидроксидом цинка, которые наносят на поверхность гранул удобрения

в количестве 0,03...0,08 %. Такая обработка позволяет повысить водостойкость удобрения. Применяют также смеси нефтяных остатков и композиции ПАВ, состоящие из алкилсульфонатов и бензолсульфонатов натрия, оксиэтилированных высших жирных спиртов для кондиционирования удобрений. Соотношение – нефтяные остатки: ПАВ = 1:(0,05...0,1), количество смеси – 0,02...0,5 % от массы удобрения.

Для снижения пылимости мелкозернистого хлорида калия можно использовать смесь нафтеновых кислот с нефтепродуктами, амины в смеси с жирами, восками и анионными ПАВ [3], обработку в пульпе минеральных частиц нефтепродуктами в смеси с флотационными реагентами, обезвоженный вакуумный газойль [4]. Основными недостатками известных способов подавления пылимости минеральных удобрений являются отсутствие производства этих реагентов в Республике Беларусь, их высокая стоимость и дефицитность, а также технологические трудности реализации этих способов.

В настоящее время в ОАО «Беларуськалий» в качестве пылеподавателя мелкозернистого и гранулированного хлорида калия используется полиэтиленгликоль (ПЭГ-400) импортного производства в виде 50 %-ного водного раствора. Обработка полиэтиленгликолем производится в смесителе перед складированием КС1. Для устранения эффекта вторичной пылимости КС1 перед погрузкой в железнодорожные вагоны еще раз обрабатывается полиэтиленгликолем. На третьей СОФ он обрабатывается пылеподавателем в количестве 0,25...0,3 %, что обеспечивает получение кондиционного продукта. На первой и второй СОФ в качестве пылеподавателей наряду с ПЭГ применяются водные эмульсии солянокислых аминов с углеводородами (слоп-вокс, вакуумный газойль).

Механизм действия применяемых пылеподавателей обусловлен смачиванием поверхности частиц КС1 и образованием жидкостных контактов между ними, приводящих к агрегации мелкодисперсных частиц в более крупные. Ни один из существующих пылеподавателей не отвечает современным требованиям к качеству удобрений, в связи с чем необходимо проведение исследований по разработке новых эффективных пылеподавателей КС1 и определение оптимальных условий их применения.

Исследования по разработке пылеподавателя для флотационного мелкозернистого хлорида калия базировались на анализе процессов в дисперсиях удобрений. Эффективность пылеподавателей зависит от величины сил адгезии между пылеподавателем и поверхностью частиц КС1 (работа адгезии), а также от величины сил когезии между молекулами пылеподавателя при сохранении основных физико-механических свойств удобрений (влагопоглощение, слеживаемость, прочность и др.). При недостаточно больших силах адгезии пылеподавателя к поверхности частиц и сил его когезии жидкостные контакты между частицами недостаточно прочны для образования агрегатов пылеобразных частиц, а образовавшиеся агрегаты легко разрушаются уже при слабом механической воздействию. При высоких значениях этих сил вместе с образованием агрегатов частиц будет образовываться сплошная объемная структура в складированном массиве хлорида калия с потерей его текучести (сыпучести). Степень агрегации мелкодисперсных частиц зависит от величины удельного расхода применяемого пылеподавателя, оптимальное значение которого определяется опытным путем. Эталоном эффективного пылеподавателя был принят ПЭГ-400 импортного производства.

В основу исследований был заложен новый подход к использованию гидрофобных соединений. Исследования свойств выпускаемых в Республике Беларусь индивидуальных аполярных соединений показывают, что по величинам вязкости углеводородов, характеризующей когезионные силы и работы адгезии, наиболее перспективны в качестве пылеподавателя пластификатор нефтяной (масло ПН-6), ЭФОМ. Для сравнения были использованы ряд гидрофильных (полиэтиленгликоль ПЭГ-400, эмульсия змульсола ЭМ-1, водный раствор оксаля) и гидрофобных соединений (индустриальные масла И-20А, И-30А, И-40А, И-50А, низкомолекулярный полиэтилен, хлорпарафин, петролатум, гач, нейтральное и рапсовое масла).

Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением удельного расхода эмульсола ЭМ-1 (смесь минерального масла И-40А, талового масла, триэтаноламина и др.) наблюдается некоторое снижение пылимости хлорида калия. Однако снижение существенно ниже по сравнению с использованием ПЭГ.

При индивидуальном применении оксаля (побочный продукт производства диметилдиоксана) его пылеподавляющее действие на мелкодисперсный КС1 несколько ниже по сравнению с ПЭГ. Эффективность пылеподавления совместных водных растворов оксаля и ПЭГ зависит от массового соотношения компонентов и возрастает с увеличением доли ПЭГ в растворе. При массовом соотношении оксаля к ПЭГ, равном 1:3, она практически одинакова с индивидуальным применением ПЭГ. Недостатками этого композиционного пылеподавателя являются относительно невысокая температура вспышки оксаля (90 °С), повышенная гигроскопичность при оптимальных расходах, высокая стоимость и отсутствие производства в Республике Беларусь.

В таблице 1 представлены результаты исследований влияния масел различных марок производства ПО «Нафтан» и смеси индустриального масла И-40А с амином (Флотигам) на пылимость мелкозернистого КС1. Индустриальные масла с низкой вязкостью по сравнению с ПЭГ при исследованных удель-

ных расходах обладают относительно невысоким пылеподавляющим действием на мелкодисперсный хлорид калия. С повышением вязкости промышленных масел их эффективность пылеподавляющего действия заметно повышается. Однако даже масло И-50А при максимальном удельном расходе 0,6 % не обеспечивает регламентного показателя (200 г/т) по пылимости.

Таблица 1

Влияние масел на пылимость мелкозернистого КСІ СОФ 3 РУ, г/т

Пылеподаватель	Расход пылеподавателя, %					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ПЭГ	3200	3030	1040	206	104	57
И-20А	4200	4107	3340	2014	1800	1504
И-30А	4210	3890	3160	1812	610	605
И-40А	4030	2820	2450	1070	630	584
И-50А	3960	2660	1780	830	680	507
И-40А + Флотигам (30 : 1)	3700	2550	1540	870	480	386
И-40А + Флотигам (20 : 1)	3830	2280	1160	520	360	267

Примечание: пылимость необработанного хлорида калия 45 кг пыли/т КСІ.

Смеси промышленного масла И-40А с амином более эффективны по сравнению с индивидуальным применением промышленного масла и при удельном расходе смеси с массовым соотношением 20:1, равном 0,6 %, пылимость составила 267 г/т, что приближается к регламентному показателю, но вместе с тем ниже показателей, достигаемых при использовании ПЭГ. При охлаждении этой смеси ниже 50 °С происходит ее расслоение на амин и промышленное масло, что может вызвать осложнения в технологическом процессе пылеподавления.

Результаты исследований по влиянию углеводов и масел (табл. 2) показывают, что нейтральное и рапсовое масла оказывают на мелкозернистый КСІ лишь незначительное пылеподавляющее действие. Хлорпарафин, петролатум, гач и талловое масло уменьшают пылимость КСІ в большей степени, но их пылеподавляющее действие значительно ниже, чем полиэтиленгликоля. Из вышеперечисленных пылеподавателей лишь низкомолекулярный полиэтилен по эффективности пылеподавления не уступает полиэтиленгликолю. Вместе с тем непостоянство свойств, высокие температуры плавления (55...90 °С), высокая вязкость и необходимость интенсивного перемешивания с КСІ могут вызвать значительные затруднения при промышленном использовании этого пылеподавателя.

Таблица 2

Влияние углеводов и масел на пылимость хлорида калия, г/т

Пылеподаватель	Расход пылеподавателя, %					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ПЭГ	3200	3030	1040	206	104	57
Хлорпарафин	3780	3450	2810	1990	820	762
Петролатум	3920	3270	3140	2460	1100	971
Гач	3730	3010	2630	2100	950	570
НМПЭ	3300	1980	906	220	109	20
Нейтральное масло	4170	3840	3230	2860	2710	2504
Рапсовое масло	4250	4050	3700	3208	3020	2610

Примечание: содержание пыли в необработанном образце составляет 4,5 %.

Результаты исследований влияния ПН-6 – продукта на основе алифатических и ароматических углеводов с небольшим количеством азотсодержащих соединений (сложные амины) – и его смесей с амином Флотигам на пылимость мелкозернистого КСІ (табл. 3) показали, что при удельном расходе пластификатора 0,6 % пылимость хлорида калия снизилась до 209 г/т, а при расходе ПЭГ 0,4 % она составила 206 г/т, т.е. коэффициент замены ПЭГ пластификатором приблизительно равен 1,5. Введение в состав пластификатора амина при массовом соотношении (60...20):1 повышает эффективность пылеподавателя, и коэффициент замены им ПЭГ становится равным 1. Пластификатор и его смеси с амином при температурах 70...90 °С имеют значительную вязкость, в связи с чем положительные результаты достигаются лишь при его интенсивном перемешивании с КСІ. Введение амина в состав пылеподавателя улучшает смачиваемость пылеобразных частиц хлорида калия, вследствие чего его эффективность повышается.

Таблица 3

Влияние пластификатора нефтяного ПН-6 и его смесей с амином на пылимость мелкозернистого хлорида калия, г/т

Пылеподаватель	Расход пылеподавателя, %					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ПЭГ	3200	3030	1040	206	104	57
ПН-6	3760	3180	1550	401	348	203
ПН-6 : Флотигам (60 : 1)	3840	2870	1030	236	97	44
ПН-6 : Флотигам (30 : 1)	3880	2680	1050	203	82	41
ПН-6 : Флотигам (20 : 1)	3660	2790	1090	209	89	45

Примечание: содержание пыли в необработанном образце составляет 4,5 %.

Близкие по показателям результаты получаются при использовании в качестве пылеподавателя экстракта фенольной очистки масел и его смесей с амином (табл. 4). При удельном расходе ЭФОМ 0,6 % пылимость хлорида калия составила 219 г/т, что практически равно пылимости при использовании ПЭГ в количестве 0,4 %. Эффективность ЭФОМ при использовании в качестве пылеподавателя несколько ниже нефтяного пластификатора, но это компенсируется его более низкой стоимостью и вязкостью. Введение в состав ЭФОМ амина в массовом соотношении (60...20) : 1 снижает коэффициент замены им ПЭГ, он составляет при этом примерно 1,2...1,5. Эффективное применение ЭФОМ требует интенсивного перемешивания его с мелкозернистым КСІ.

Таким образом, масло ПН-6 и ЭФОМ являются эффективными пылеподавателями и позволяют заменить ПЭГ при производстве непылящего мелкозернистого хлорида калия.

Таблица 4

Влияние ЭФОМ и его смесей с амином на пылимость мелкозернистого КСІ

Пылеподаватель	Расход пылеподавателя, %					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ПЭГ	3200	3030	1040	206	104	57
ЭФОМ	4040	3720	2810	936	444	219
ЭФОМ : Флотигам (60:1)	4120	3850	2560	820	301	186
ЭФОМ : Флотигам (30:1)	4050	3300	1310	850	266	104
ЭФОМ : Флотигам (20:1)	3980	3040	1270	565	201	95

Примечание: содержание пыли в необработанном образце составляет 4,5 %.

Результаты промышленных испытаний экстракта фенольной очистки масел в качестве пылеподавателя мелкозернистого хлорида калия на СОФ 3 РУ ОАО «Беларуськалий». На СОФ 3 РУ ОАО «Беларуськалий» были проведены промышленные испытания экстракта фенольной очистки масел (экстракта нефтяного) в качестве пылеподавателя агломерированного мелкозернистого хлорида калия. Была наработана опытная партия продукта в количестве 2500 т. В процессе испытаний удельный расход экстракта фенольной очистки масел варьировался в пределах от 0,14 до 0,36 % и в среднем составил 0,16 %. Температура ЭФОМ, подаваемого на обработку КСІ, была равна 40...50 °С.

Пылимость при наработке продукта изменялась в зависимости от удельного расхода реагента от 153 до 28 г/т, что указывает на возможность ее регулирования в широких пределах.

Наработанная опытная партия КСІ была отгружена потребителю с контролем по пылимости и текучести. Во всех отобранных пробах текучесть соответствовала норме или превышала допустимую величину, а пылимость не превышала показателя 78 г/т.

В связи с неравномерностью подачи ЭФОМ в процессе из-за забивания распыляющей форсунки в ночную смену, связанного с низкой температурой реагента, а также образованием вторичной пылимости за счет разрушения агломератов при механических воздействиях, было рекомендовано повысить температуру ЭФОМ до 60 °С при обработке хлорида калия и обеспечить, как и при использовании ПЭГ в качестве пылеподавателя, дополнительную обработку реагентом ЭФОМ хлорида калия при его погрузке в железнодорожные вагоны.

Последующие промышленные испытания ЭФОМ в качестве пылеподавателя на СОФ 3 РУ подтвердили высокую эффективность разработанного пылеподавателя. Реагент внедрен в производство и

работает до настоящего времени. Его использование позволяет полностью заменить импортный ПЭГ в качестве пылеподавателя мелкозернистого КСІ. Удельный расход ЭФОМ в процессе испытаний оказался близким к удельному расходу ПЭГ.

Результаты промышленных испытаний технологии кондиционирования мелкозернистого хлорида калия эмульсиями. По результатам проведенных исследований и промышленных испытаний эмульсии (вакуумный газойль и ЭФОМ) с эмульгаторами (основание амина Флотигам и солянокислый амин) предложены для использования в качестве пылеподавателей-антислеживателей мелкозернистого хлорида калия. По эффективности пылеподавляющего действия эти эмульсии превосходят применяемые ныне реагенты. Эмульсии готовят путем введения расчетного количества экстракта в 5 %-ный водный раствор солянокислого амина при температуре 70 ± 5 °С и дальнейшего перемешивания в реактном чане до образования однородной консистенции. Массовое соотношение вакуумного газойля или экстракта фенольной очистки масел к солянокислому амину равно 10 : 1, удельный расход по активным компонентам – 0,08...0,12 %, температура эмульсии – 60...80 °С. При температуре эмульсии ниже 50 °С происходит расслоение и резкое ухудшение пылеподавляющего и антислеживающего действия.

Они внедрены на первом и втором РУ ОАО «Беларуськалий» в качестве пылеподавателей-антислеживателей мелкозернистого хлорида калия.

Заключение. Проведенное исследование показало, что гранулы перед складированием для повышения влагостойкости, снижения пылимости и слеживаемости целесообразно обрабатывать аминогазойлевой смесью (0,005...0,01 % амина, 0,2...0,25 % вакуумного газойля), а перед погрузкой со склада в железнодорожный или морской транспорт проводить дополнительную обработку индустриальными маслами И-20А и др., вакуумным газойлем в количестве 0,1...0,2 % и более (в зависимости от исходной пылимости гранул). По результатам испытаний разработаны технология и режимы обработки гранул для каждой СОФ ОАО «Беларуськалий» в отдельности, которые внедрены в производство и работают до настоящего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувшинников, И.М. Минеральные удобрения и соли. Свойства и способы их улучшения / И.М. Кувшинников. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
2. Влияние поверхностно-активных модификаторов (алифатических аминов и их солей) на физико-химические свойства гранулированных удобрений / Э.Ф. Коршук [и др.] // Журнал прикладной химии. – 1999, Т. 72. – № 4. – С. 559 – 563.
3. Влияние природы модификаторов на физико-механические свойства калийных удобрений / Н.П. Крутько [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. – 1994. – № 1. – С. 84 – 88.
4. Орлова, Р.П. Исследование физико-химических свойств некоторых оксиэтилированных соединений при флотации руд / Р.П. Орлова. – М.: Химия, 1974. – 138 с.

Поступила 05.02.2013

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON THE PRODUCT OF PETROLEUM HYDROCARBONS' PROCESSING FOR CONDITIONING OF POTASH FERTILIZERS

V. SCHERBA

An urgent issue of decreasing of dust and blocking property of produced potash fertilizers by creation and application of effective composite materials is considered. It is suggested to use oil refining products and their mixtures as anticaking, dust suppressing and flotation reagents while mineral fertilizers producing. The basis of researches forms new approach to the use of hydrophobic compounds. Technology and treatment modes of potassium chloride granules with these reagents were developed. Research showed, that decrease of dust and blocking property of potash fertilizers is provided at less specific consumption of corresponding materials compared to the technology in use, which has economic significance.

УДК 631.3.004.67

УДАЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ, ПРОЧНО СВЯЗАННЫХ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ДЕТАЛЕЙ

канд. техн. наук В.И. СЕМЕНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируются результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию процесса очистки деталей от прочных загрязнений на примере нагара. Показан процесс удаления прочносвязанных загрязнений с поверхностью деталей стеклянными шариками в струе сжатого воздуха. Разработана и внедрена в производство установка для очистки от нагара поршней двигателей внутреннего сгорания, срок окупаемости которой при внедрении на производстве составляет 1,5...2 года.

Одна из наиболее ответственных операций при ремонте агрегатов и машин сельскохозяйственной техники – очистка деталей от загрязнений. На ремонтных предприятиях под моечно-очистными участками занято до 12 % производственных площадей, на долю которых приходится 6...8 % от балансовой стоимости ремонтно-технологического оборудования [1]. Качественная очистка рабочих поверхностей деталей ремонтируемой техники существенно влияет на все технологические процессы ремонта и во многом обеспечивает надежность машин в процессе их последующей эксплуатации.

Вопросы удаления прочносвязанных загрязнений (нагара, накипи, продуктов коррозии) с поверхностей деталей в настоящее время сосредоточены на исследовании рациональных способов – гидро- и пневмоабразивной очистке, а также на выборе абразивного материала в качестве реагента. Совершенствование способов пневмоабразивной очистки идет по пути замены абразивных групп – металлического реагента (дроби, металлической стружки), органической (косточковой крошки, дробленой скорлупы орехов) и горных пород (гранита, кварца) – искусственными: карборундом, стеклянными шариками, электрокорундом.

Из группы искусственных абразивов наиболее перспективным реагентом являются стеклянные шарики как характеризующиеся наибольшим значением коэффициента восстановления при ударе (15/16), при этом при ударе о поверхность эти шарики не оставляют на ней следа. В связи с этим разработка технологического процесса и устройства для очистки поверхностей деталей от прочносвязанных загрязнений движущимися стеклянными шариками является актуальной задачей.

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса удаления прочносвязанных загрязнений с поверхностей деталей стеклянными шариками в струе сжатого воздуха.

При пневмоабразивной очистке поверхностей деталей измельченный абразив (металлическая стружка, дробь и т.п.) вводится в воздушный поток, который направляется на очищаемую поверхность. При этом приобретенная кинетическая энергия расходуется на удаление загрязнения, а также на деформирование поверхностного слоя металла, что вызывает изменение размеров и шероховатости поверхности. Кроме того, на поверхности появляются царапины. Применение в качестве абразива стеклянных шариков устраняет указанные недостатки [2].

Первое решение задачи о съеме загрязнения струей сжатого воздуха с примесью частиц абразива изложено в работе [3]. В основу математической модели [3] положен общий характер процессов разрушения потоком абразивных частиц высокой плотности и резания металла внедряющимся клином, и принята гипотеза о линейном съеме материала за некоторый промежуток времени. Отметим, что в [3] получена обратная экспоненциальная зависимость съема от времени. Это означает, что полный съем загрязнения с детали достигается при времени $t \rightarrow \infty$, что лишено физического смысла. Этот факт объясняется тем, что в решении не учтены силы инерции.

Рассмотрим эту задачу на основе второго закона Ньютона, оставаясь в рамках предложений [3].

Задача сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k^2x = 0, \quad (1)$$

где x – координата, отсчитываемая вглубь слоя загрязнения от его поверхности по нормали; $k^2 = \frac{c\sigma_6}{\mu m_q}$ – коэффициент разрушения; σ_6 – предел прочности при сжатии; m_q – масса частиц абразива, соударяющихся с поверхностью в единицу времени; c – коэффициент жесткости загрязнения; $\mu = \frac{m_q v_q}{F}$ – удельный импульс потока абразивных частиц; $m_q v_q$ – импульс абразивных частиц, вызывающих разрушение; v_q – средняя скорость частиц абразива в момент соударения с очищаемой поверхностью; F – площадь следа струи.

Начальные условия задачи:

при $t = 0 \quad x = 0 \quad \text{и} \quad \frac{dx}{dt} = 0.$ (2)

Уравнение (1) представляет собой уравнение свободных гармонических колебаний материальной точки [4] и с учетом граничных условий (2) имеет следующее решение:

$$x = \frac{v_0}{k} \sin kt, \quad (3)$$

или в безразмерном виде (в относительных координатах)

$$\bar{x} = \sin \frac{\pi}{2} \bar{t}, \quad (4)$$

где $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$; $\bar{t} = \frac{t}{t_\delta}$; δ – толщина слоя нагара; t_δ – время полной очистки поверхности от нагара.

Таким образом, получен закон изменения толщины текущего съема загрязнения толщиной x от времени t (3), или то же самое – в относительных (безразмерных) координатах \bar{x} и \bar{t} (4).

Определяли оптимальное время очистки партии поршней в количестве 100 единиц двигателей внутреннего сгорания ЗМЗ-53 стеклянными шариками диаметром 0,5 – 0,8 мм в струе сжатого воздуха [5].

На диаграмме (рис. 1) представлены результаты анализа степени загрязнения группы поршней двигателей ЗМЗ-53, которая оценивалась по толщине слоя нагара на днище поршня δ ($\delta > 0,1$ мм). Видно, что наибольшее количество поршней имеют толщину слоя нагара от 0,1 до 0,5 мм и одна треть исследованных поршней (32 %) имеют толщину слоя нагара 0,2...0,5 мм.

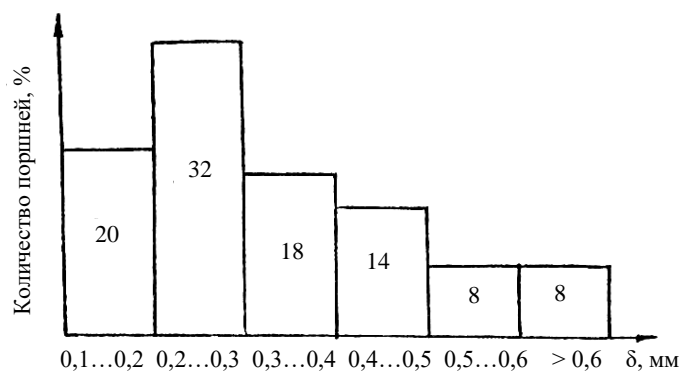


Рис. 1. Распределение количества поршней в зависимости от толщины нагара δ

На рисунке 2 представлены результаты определения оптимального времени очистки шести групп поршней в количестве 100 шт. каждая. В качестве очищенного поршня считался такой поршень, толщина слоя нагара на днище которого не превышала 0,02 мм.

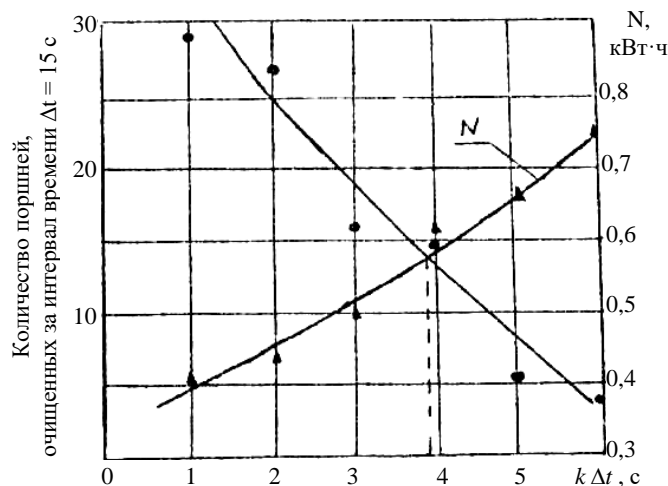


Рис. 2. Определение оптимального времени очистки поршней двигателя ЗМЗ-53 стеклянными шариками в струе сжатого воздуха

На графике (см. рис. 2) по оси абсцисс отложены интервалы времени $k \Delta t$ ($\Delta t = 15$ с, $k = 0, 1, \dots, 6$), за которые проводилась очистка группы поршней. После каждого интервала времени проводились очистка группы поршней и измерения толщин неочищенного слоя нагара. Очищенные поршни направлялись на следующую операцию ремонта. Остальные поршни подвергались заново очистке в течение следующего интервала времени и т.д. По оси ординат на графике отложено количество поршней, очищенных за следующий интервал времени Δt , и мощность N , необходимая для очистки этих поршней. Из рисунка видно, что при увеличении интервалов времени от 1 до 6 мощность, затрачиваемая на очистку поршней, увеличивается в два раза, в то же время количество очищенных поршней резко уменьшается; оптимальное время очистки группы поршней соответствует $t = 60$ с ($k \Delta t = 4$).

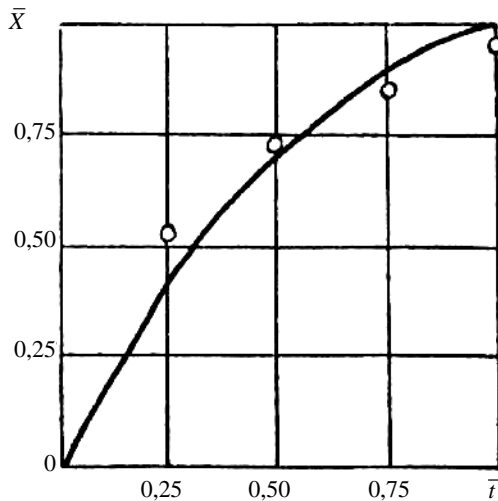


Рис. 3. Изменение относительной толщины слоя нагара \bar{X} от относительного времени \bar{t} при очистке поршней стеклянными шариками в струе сжатого воздуха

На рисунке 3 точками представлены результаты изменения относительной толщины слоя нагара от относительного времени; сплошной линией проиллюстрирована зависимость (4). Результаты измерений с достаточной степенью точности соответствуют аналитическому решению (4).

Очистка деталей стеклянными шариками в струе сжатого воздуха внедрена в производство. Этот вид очистки по сравнению с очисткой деталей косточковой крошкой более производительный, здесь меньшая стоимость очистного агента, машина имеет меньшие габариты, а процесс легче механизмуется.

Установка для очистки от нагара поршней двигателей внутреннего сгорания (рис. 4) включает корпус 1 с приводом, камеры 7 и сборник-фильтр 10.

На корпусе 1 установлены все узлы установки. Электродвигатель 2 посредством клиноременной передачи 3 приводит в движение червячный редуктор 4, который, в свою очередь, клиноременной передачей 5 соединен с двумя шкивами, установленными на валах 6. На других концах валов закреплены стаканы, в которые устанавливаются очищаемые детали.

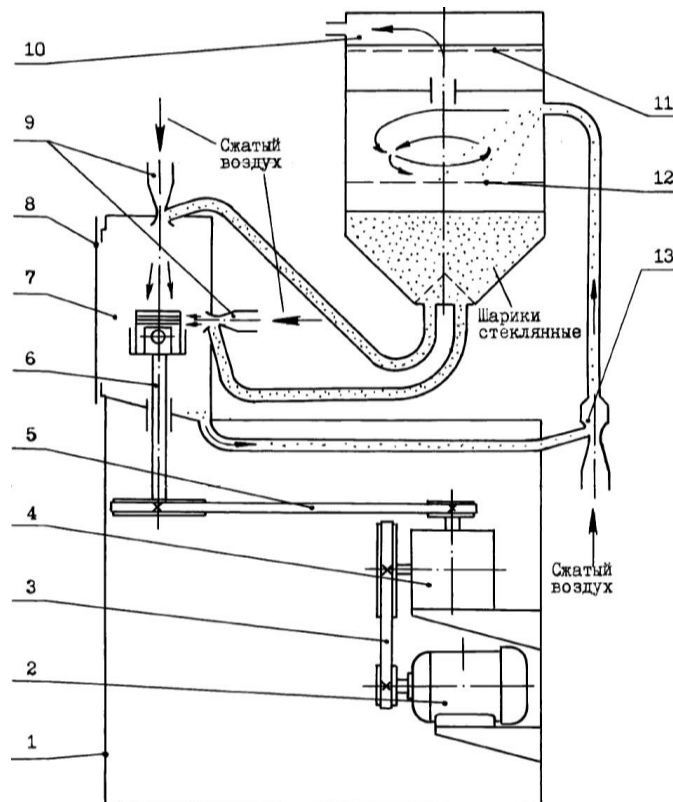


Рис. 4. Машина для очистки деталей потоком стеклянных шариков

В сборнике-фильтре 10 находится запас стеклянных шариков, матерчатый фильтр 11 и фильтрующая сетка 12. Шланги для подачи шариков к эжекционным форсункам 9 подключены к основанию конусного дна сборника. Патрубок, по которому шарики возвращаются в сборник-фильтр, расположен тангенциально его корпусу.

В два стакана на валах 6 устанавливаются очищаемые детали и закрываются двери 8 камер 7. Эжекционные форсунки создают разрежение в подводных шлангах, что приводит к поступлению шариков к форсункам. Шарики из фильтра-отстойника попадают в струю сжатого воздуха и приобретают необходимую энергию для разрушения нагара в момент соударения с загрязнением. Верхние форсунки, установленные в камерах 7, очищают днище поршня, а боковые форсунки – канавки под поршневые кольца.

Шарики после соударения с нагаром попадают вместе с частицами загрязнений на наклонное дно камеры, а затем за счет работы эжектора 13 – в сборник-фильтр. Шарики просыпаются через сетку 12, на которой задерживаются частицы загрязнения. Отработавший воздух через фильтр 11 выходит в атмосферу в очищенном состоянии.

Выводы:

1) применение стеклянных шариков в качестве реагента при пневмоабразивной очистке поверхностей от прочносвязанных загрязнений в отличие от других реагентов позволяет очистить поверхность без ее деформации, сохранить заданные размеры и избежать следов от абразива;

2) аналитическое решение задачи о съеме загрязнения с поверхности детали струей воздуха с примесью абразива позволяет определить зависимость толщины слоя съема загрязнения от времени с учетом физико-механических свойств абразива и критического напряжения разрушения загрязнения;

3) на основе анализа экспериментальных исследований степени загрязнения поршней двигателей внутреннего сгорания установлено, что наибольшее количество поршней имеет толщину слоя нагара 0,1 ... 0,5 мм. Из них около 32 % имеют толщину слоя нагара 0,2...0,5 мм;

4) оптимальное время очистки днища поршней двигателей ЗМЗ-53 от нагара струей воздуха со стеклянными шариками не превышает 1 мин;

5) процесс и установка для очистки поршней от нагара струей воздуха со стеклянными шариками внедрены в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробко, В.И. Технологическое оснащение ремонтного производства / В.И. Коробко, В.П. Иванов, В.И. Семенов. – Минск: Універсітэцкае, 1994. – 140 с.
2. Бабаджанов, С.К. Беспылевое удаление старых лакокрасочных покрытий с деталей машин при их ремонте: автореф ... дис. канд. техн. наук: 05.20.03 / С.К. Бабаджанов; ГОСНИТИ. – М., 1990. – 20 с.
3. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей и машин / А.Е. Проволоцкий. – Киев: Техника, 1989. – 177 с.
4. Бухольц, Н.Н. Основной курс теоретической механики / Н.Н. Бухольц. – Ч. 1. – М.: Наука, 1990. – 364 с.
5. Семенов, В.И. Удаление прочносвязанных загрязнений с деталей машин при ремонте: автореф ... дис. канд. техн. наук: 05.20.03 / В.И. Семенов; ГОСНИТИ. – М., 1990. – 15 с.

Поступила 11.07.2013

REMOVAL OF POLLUTION SOLIDLY CONNECTED WITH THE SURFACES OF COMPONENTS

V. SEMENOV

The results of theoretical and experimental studies to validate the cleaning process of parts of stubborn dirt on the example of a deposit are demonstrated. The process of removal of solidly connected pollution from the surface of components by glass balls in the spurt of compressed air. Plant for cleaning of soot piston from internal combustion of engines is developed and implemented in the production. The payback period for the implementation of the production is within 1.5...2 years.

УДК621.9.048

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С ЦЕЛЬЮ ПРИДАНИЯ ЕЙ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц. А.В. ДРОЗДОВ,
А.В. МОСКАЛЕНКО, П.С. БОГДАН
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается экспериментальная оценка эффективности применения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного (непрофилированного) инструмента с целью придания ей режущей способности. Установлено, что в результате такой обработки на поверхности проволоки образуются характерные для электроэрозионной обработки углубления (лунки), имеющие по краям наплывы металла, выходящие за контур проволоки. Показано, что эти наплывы металла представляют собой своеобразные режущие элементы (миниатюрные фасонные резцы), способные срезать материал заготовки, твердость которого ниже твердости проволочного инструмента. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность применения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности.

Введение. В предшествующих исследованиях [1 – 3] использование электроконтактной обработки (ЭКО) поверхности проволочного инструмента изучалось с точки зрения ее влияния на повышение его режущей способности при выполнении операции распиливания твердых материалов с применением абразивных частиц, подаваемых в зону обработки в составе абразивной суспензии.

На основании анализа полученных экспериментальных данных установлено, что после ЭКО в результате электрической эрозии на поверхности проволочного инструмента образуются характерные лунки (углубления). В процессе распиливания они играют роль конструктивных элементов, препятствующих перекатыванию абразивных частиц в зоне скользящего контакта поверхностей инструмента и заготовки. В результате ее материал подвергается воздействию большего, чем при использовании инструмента с исходной (гладкой) поверхностью, количества абразивных частиц, находящихся в зоне обработки в закрепленном состоянии. По сравнению с перекатывающимися они вызывают более интенсивное разрушение материала заготовки, обуславливая тем самым повышение режущей способности (интенсивности распиливания) проволочного инструмента с модифицированной за счет ЭКО поверхностью в сравнении с аналогичным показателем у инструмента, применяемого в исходном ее состоянии. Специфической особенностью формируемых на поверхности инструмента лунок является наличие по их краям характерных наплывов металла, выходящих за исходный диаметр проволоки (рис. 1).

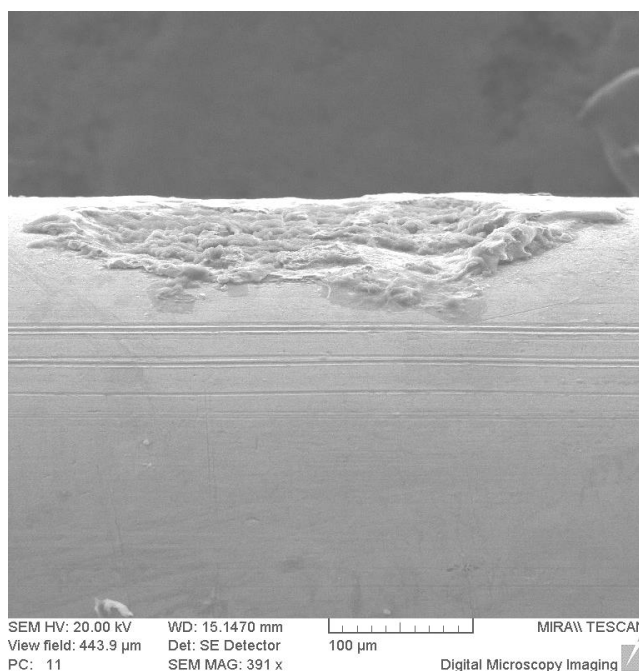


Рис. 1. Поверхность проволочного инструмента после ее ЭКО

В процессе ЭКО наплывы металла образуются в результате выброса расплавленного металла из лунки и его последующего затвердевания по ее краю в месте пересечения с поверхностью проволоки. В принципе, эти наплывы металла на поверхности проволоки оправданно рассматривать как режущие элементы, способные в процессе распиливания разрушать (срезать) материал заготовки, твердость которого ниже твердости металлической проволоки, отказавшись при этом от использования абразивного материала. Следовательно, в этом случае применение электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента направлено на придание непосредственно ей режущей способности.

Однако в настоящее время отсутствуют систематизированные как теоретические, так и экспериментальные данные, отражающие возможность и целесообразность применения предлагаемого способа модификации исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности. В этой связи целью данной работы явилась экспериментальная оценка эффективности использования электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента для обеспечения его режущей способности.

Методика проведения экспериментальных исследований. На рисунке 2 представлена экспериментальная установка, примененная в исследованиях для электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента. Она состоит из деревянного массивного основания 1, на котором смонтирована установочная призма 2, в которой закреплен электродвигатель постоянного тока 3 с встроенным редуктором. На его валу между двумя фланцами 4 консольно закреплены проволочные электроды-инструменты 5. При работе электродвигателя они периодически контактируют с обрабатываемой поверхностью образца проволочного инструмента 6, закрепленного в натянутом состоянии между концами П-образной рамки 7. Последняя с помощью направляющих 8 устанавливается в рабочем положении и имеет возможность продольного перемещения по ним вдоль оси обрабатываемой проволоки.

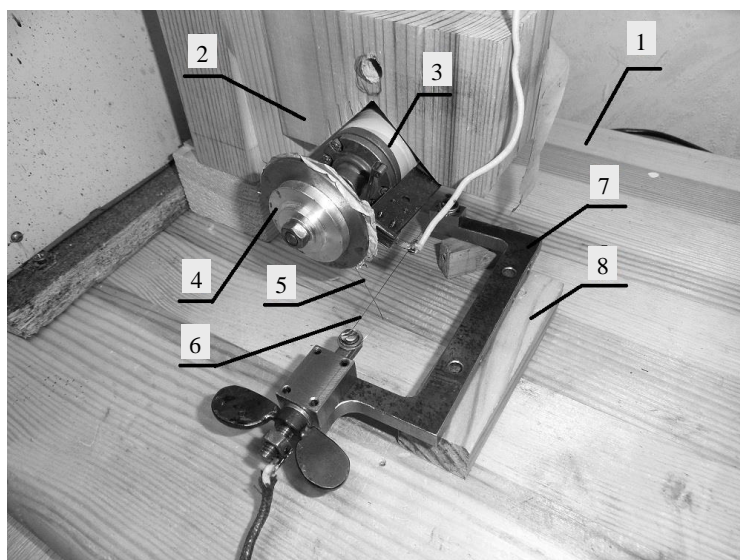


Рис. 2. Экспериментальная установка для ЭКО проволочного инструмента

Электрическая часть установки собрана в отдельном блоке и включает в себя источник постоянного тока с регулируемой величиной напряжения, батарею накопительных конденсаторов с изменяющейся емкостью, подключенных параллельно к периодически контактирующим поверхностям инструмента и обрабатываемой заготовки, а также последовательно включенного в цепь токоограничивающего резистора (галогеновая лампа). В качестве электродов-инструментов использовалась стальная проволока диаметром 0,35 мм, имеющая при ее закреплении между фланцами свободную длину 50 мм. Электроконтактной обработке подвергались стальные проволочные образцы исходным диаметром 0,35 мм. Выполнялась она при прямой полярности (анодом служила обрабатываемая проволока) и на воздухе без использования диэлектрической жидкости. В ходе проведения экспериментов варьировались следующие параметры режима ЭКО: напряжение накопительного конденсатора U (изменялось от 36 до 75 В) и его емкость C (изменялась от 70 до 250 мкФ); частота прерывания электрической цепи за счет изменения частоты вращения двух проволочных электродов-инструментов f регулировалась от 2 до 10 Гц, а скорость продольного перемещения обрабатываемого образца во всех случаях оставалась постоянной и составляла 15 мм/с.

Для определения максимальной высоты наплывов металла, образовавшихся на цилиндрической поверхности проволоки в результате ее электроконтактной обработки, использовалась следующая мето-

дика. Первоначально с помощью электронного микрометра с ценой деления 1 мкм определялся диаметр проволоочного образца, закрепленного в рамке, в исходном состоянии его поверхности. Измерения выполнялись в трех по длине образца сечениях: в средней его части и на расстоянии 10 и 15 мм по обе стороны от него. За окончательное значение диаметра проволоки принималось среднее арифметическое результатов этих измерений. Аналогичным образом измерялся диаметральный размер инструмента после его электроконтактной обработки. Учитывая, что она осуществлялась в одном продольном сечении проволоки, т.е. наплывы металла располагались только со стороны рабочей части инструмента, разность диаметрального размера и исходного диаметра проволоки соответствует их максимальной высоте.

После этого рамка с обработанным проволоочным образцом монтировалась на специально созданной установке для определения его режущей способности [3]. Она оценивалась по интенсивности распиливания им образцов из различных материалов, которая определялась отношением площади пропиленного на них участка S ко времени обработки t , $i = S / t$ (мм²/мин). В принятой технологической схеме распиливания проволоочный инструмент прижимается с постоянным усилием (300 Н) к поверхности образца, совершающего относительно него возвратно-поступательное движение с частотой 30 дв. ход/мин и величиной хода 100 мм. Во всех экспериментах продолжительность распиливания была постоянной и составляла 10 мин. Глубина полученного на образцах пропила определялась с помощью микроскопа ММИ-2, после чего вычислялась площадь удаленного на нем материала. Использовались образцы из дерева (сухая сосна), органического стекла, мрамора и кости.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Влияние напряжения накопительного конденсатора при выполнении ЭКО проволоочного инструмента на высоту наплывов металла, получаемых на его поверхности, а также на значение интенсивности распиливания им образцов из различных материалов отражают данные, приведенные в таблице.

Высота наплывов металла на поверхности проволоочного инструмента и значение интенсивности распиливания им образцов из различных материалов в зависимости от напряжения накопительного конденсатора

Напряжение накопительного конденсатора, В	Высота наплывов металла на модифицированной поверхности проволоочного инструмента, мкм	Интенсивность распиливания образцов из различных материалов, мм ² /мин			
		мрамор	органическое стекло	кость	дерево
36	4	0	0,15	1,2	0,27
42	5	0,45	0,3	1,2	0,45
75	18	2,4	3,3	8	16,2

Из анализа этих данных следует, что с повышением напряжения накопительного конденсатора в ходе выполнения электроконтактной обработки проволоочного инструмента высота формируемых на его поверхности наплывов металла нелинейно возрастает, достигая 18 мкм при $U = 75$ В против 4 мкм при $U = 36$ В. Такая зависимость объясняется тем, что с повышением U возрастает энергия электрического импульса, действующего между электродами, а соответственно увеличивается размер образовавшейся на поверхности проволоочного образца лунки. Это сопровождается возрастанием количества выброшенного из нее расплавленного металла, в результате чего увеличивается высота его наплыва по краям лунки. Следовательно, путем изменения энергии импульса за счет регулирования напряжения накопительного конденсатора, его емкости и длительности протекания импульса можно целенаправленно влиять на высоту получаемых на обрабатываемой поверхности наплывов металла. Кроме того, как показали результаты исследования состояния обработанной поверхности проволоочного инструмента, энергия электрического импульса оказывает влияние на форму формируемых на ней наплывов металла (рис. 2).

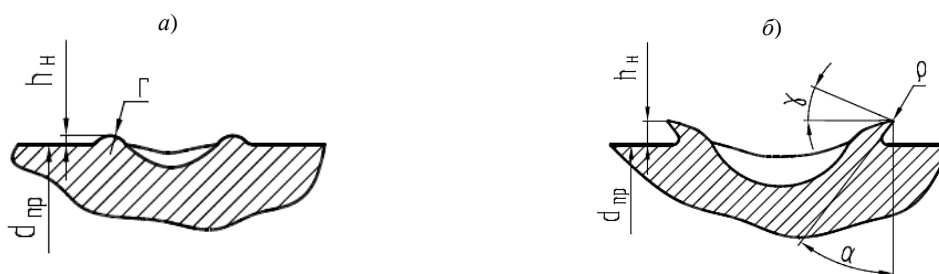


Рис. 2. Схема наплывов металла, формируемых на поверхности проволоочного инструмента в процессе ЭКО

Так, при малом значении энергии импульса эти наплывы имеют незначительную высоту и скругленную (радиусом r) по краю лунки форму (рис. 2, а). По мере возрастания этой энергии одновременно с

увеличением высоты наплывов изменяется и их форма, они становятся более вытянутыми и имеют характерную границу (кромку) в месте сопряжения с исходной поверхностью проволоки (рис. 2, б).

Следует подчеркнуть, что наличие на поверхности проволочного инструмента именно таких наплывов металла придает ей режущую способность, так как они представляют собой своеобразные режущие элементы. В частности, они характеризуются расположенной по криволинейной в плане режущей кромкой с радиусом при ее вершине ρ , передним углом γ и задним α . Поэтому в процессе распиливания они способны снимать стружку с обрабатываемого материала при условии, что его твердость ниже твердости проволочного инструмента. Причем благодаря симметричному расположению относительно центра лунки эти элементы осуществляют резание при относительном движении проволочного инструмента вдоль его оси в обоих направлениях.

Отмеченные положения полностью подтверждаются результатами экспериментальных исследований, полученных при распиливании образцов из различных материалов проволочным инструментом с модифицированной поверхностью (см. таблицу). Так, с увеличением высоты наплывов металла (режущих элементов) на исходной поверхности инструмента за счет повышения напряжения накопительного конденсатора интенсивность распиливания образцов во всех случаях нелинейно возрастает. То есть в диапазоне изменения U с 36 до 42 В наблюдается незначительное увеличение ее значения, что объясняется формированием на поверхности инструмента лунок небольших размеров с малой высотой наплывов металла (4...5 мкм), имеющих скругленную форму, которые из-за отсутствия режущей кромки не в состоянии эффективно осуществлять процесс резания обрабатываемого материала. При напряжении накопительного конденсатора 75 В на обработанной поверхности инструмента образуются лунки существенно большего размера, имеющие по краям вытянутые по форме наплывы металла значительно большей высоты (18 мкм). В этом случае в процессе распиливания они, выступая в роли миниатюрных резцов, осуществляют резание обрабатываемого материала, что подтверждается наличием продуктов разрушения в виде мелкодисперсной стружки (рис. 3). Как следует из полученных экспериментальных данных, с увеличением твердости обрабатываемого материала интенсивность его распиливания проволочным инструментом снижается. Так, наименьшее ее значение наблюдается при обработке мрамора (2,4 мм²/мин), имеющего наибольшую из примененных материалов твердость, а при распиливании наименее твердого деревянного образца она имеет максимальное значение (16,2 мм²/мин).

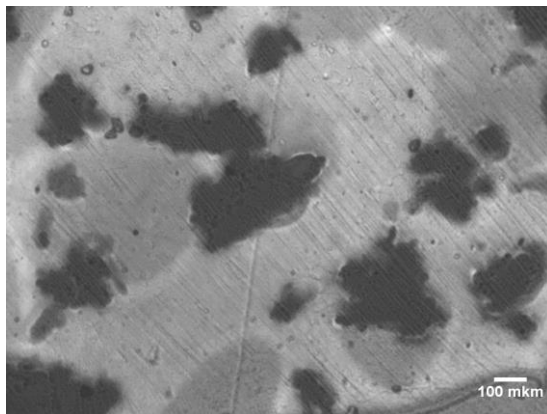


Рис. 3. Снимок стружки, полученной в процессе распиливания деревянного образца

Таким образом, экспериментально установлено, что применение электроконтактной обработки (модификации) исходной поверхности тонкой стальной проволоки позволяет придать ей режущую способность, а соответственно получить непрофилированный (проволочный) режущий инструмент, который может быть эффективно использован для обработки (распиливания, вырезания) материалов, твердость которых ниже твердости проволоки.

Выводы:

1) проведенными с помощью электронной микроскопии исследованиями состояния поверхности проволочного инструмента после ее электроконтактной обработки установлено, что в результате электрической эрозии на ней образуются характерные углубления (лунки), имеющие по краям наплывы металла, выходящие за ее исходный контур. Эти наплывы на поверхности проволочного инструмента представляют собой конструктивные элементы, придающие ей режущую способность, т.е. возможность срезать в процессе распиливания материал заготовки, твердость которого ниже твердости проволоки;

2) установлено, что геометрические параметры этих напылов (их форма и высота) зависят от энергии импульса в процессе электроконтактной обработки поверхности проволоки. Так, при низких ее значениях (напряжение накопительного конденсатора $U = 36...42$ В) образуются напылы небольшой высоты (4...5 мкм), которые имеют скругленную форму поперечного сечения и характеризуются плавным сопряжением с исходной поверхностью проволоки, а поэтому они не способны осуществлять процесс резания. В случае большой энергии импульса ($U = 75$ В) одновременно с увеличением высоты напылов до 18 мкм изменяется форма их поперечного сечения, которая характеризуется наличием выступающей острой кромки в месте сопряжения с исходной поверхностью проволоки, т.е. формируется элемент в виде миниатюрного фасонного резца, благодаря чему она приобретает режущую способность;

3) получены экспериментальные данные, отражающие влияние напряжения накопительного конденсатора (энергии импульса) в процессе электроконтактной обработки исходной поверхности стального проволочного инструмента на интенсивность распиливания им образцов из мрамора, органического стекла, кости и дерева. На основании их анализа установлено, что с увеличением U в диапазоне от 36 до 75 В интенсивность распиливания образцов нелинейно возрастает, а с повышением их твердости снижается. Значение интенсивности распиливания определяется параметрами сформированных на поверхности проволоки в процессе ее ЭКО напылов металла. Так, с увеличением их высоты с одновременным уменьшением радиуса скругления выступающих на них кромок (режущих элементов), что обеспечивается соответствующим повышением энергии импульса при ЭКО, режущая способность проволочного инструмента возрастает, а соответственно, повышается интенсивность распиливания им обрабатываемых образцов;

4) применение электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента является эффективным и простым в реализации способом придания ей режущей способности, что достигается путем формирования на ней за счет явления электрической эрозии конструктивных элементов (напылов металла), выполняющих функцию миниатюрных фасонных резцов, обеспечивающих при распиливании (вырезании) процесс резания материала заготовки, если его твердость ниже твердости проволоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности путем применения электроконтактной обработки / М.Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. 2012. – № 1(34).
2. Влияние способа выполнения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на его режущую способность / М.Г. Киселев [и др.] Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3(50).
3. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М.Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 1.

Поступила 05.03.2013

EFFECTIVENESS OF APPLICATION OF CONTACT-INITIATED MACHINING OF THE SURFACE OF WIRE INSTRUMENT TO GIVE IT CUTTING

M. KISELEV, A. DROZDOV, A. MOSKALENKO, P. BOGDAN

Experimental estimation of the effectiveness of usage of contact-initiated machining of the initial surface of wire instrument to give it cutting capacity is considered. It is stated, that as the result of such machining hollows typical for electroerosive machining are formed on the surface of wire, having dissolves of metal on the edges, which come out of the circuit of wire. It is shown, that these dissolves of metal are peculiar cutting elements (shaped cutters in miniature), able to cut the material of a workpiece, the hardness of which is lower than the hardness of wire instrument. Results of experimental studies are presented, which prove the effectiveness of application of contact-initiated machining of the initial surface of wire instrument to give it cutting capacity.

УДК 621.762:620

**ФРИКЦИОННАЯ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТЬ
БОРСОДЕРЖАЩИХ ДИФфуЗИОННЫХ И НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

*канд. техн. наук, доц. В.Г. ДАШКЕВИЧ,
канд. техн. наук А.А. ПИВОВАРЧИК, В.Г. ЩЕРБАКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Отмечена перспективность применения диффузионных процессов для получения искробезопасных материалов. Рассмотрены вопросы искрообразования борсодержащих покрытий при истирании образцов вращающимся абразивным кругом. По результатам испытаний отмечено значительное снижение искрообразования, которое связано с образованием на поверхности раскаленных частиц борного ангидрида с низкой температурой плавления. Рассмотрен механизм окисления боридных частиц, отделившихся от поверхности диффузионного покрытия при фрикционном взаимодействии.

Введение. Применяющиеся в производственных процессах горючие жидкости или газы на промышленных предприятиях могут выделяться в атмосферу и в результате их соединения с кислородом образовывать взрывоопасную смесь. В мировой практике известно много случаев взрывов и пожаров на предприятиях, вызванных воспламенением горючих смесей от фрикционных искр, например при пробуксовывании колес грузоподъемного транспорта, от нагрева трущихся и соударяющихся стальных деталей вентиляторов, от ударов стальных предметов о корродированную сталь и о стальную корродированную поверхность, покрытую алюминиевой пылью или краской.

В работе [1; 2] показано, что из распространенных в технике горючих газов и паров только пять образуют с воздухом смеси, поджигаемые фрикционными искрами: H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CS_2 , CO ; а смеси предельных и ароматических углеводородов, пропилена, спиртов, альдегидов, кетонов, эфиров искробезопасны. Для смесей CO , C_2H_2 минимальная для фрикционного поджигания концентрация составляет соответственно 32 и 42 %, максимальная – 80 и 76 %. Для CO и C_2H_2 максимальная концентрация в смесях, еще поджигаемых фрикционными искрами, меньше стехиометрической, т.е. эти искры не поджигают наиболее опасные смеси.

Кроме технических газов, наиболее распространенными опасными материалами являются также сырая нефть и продукты ее переработки, спирты, металлическая пыль (например, алюминиевая), угольная пыль, мука, крахмал, зерно, волокна. Фрикционные искры, попав на поверхности с отложениями горючих пылей или волокон, могут приводить к появлению очагов тления – мощных источников зажигания, которые способны воспламенять различные горючие смеси. Поэтому на многих предприятиях Республики Беларусь введены ограничения на использование искрообразующих материалов. Применение в таком случае изделий в соответствующем искробезопасном исполнении дает возможность сохранить традиционную практику использования оборудования и инструмента без дополнительных мер.

Основная часть. В зарубежной практике высокая степень искробезопасности, например, для ручного слесарно-монтажного инструмента обеспечивается, как правило, бронзовыми сплавами. Это ручной искробезопасный инструмент фирмы Endres Tool (Германия), который производится из специальной бронзы и обладает высокими искрозащищенными и антикоррозийными свойствами, инструмент итальянского концерна Metalminotti, международной компании Cotrem group. Искробезопасный инструмент торговой марки Sestrum изготавливается из бериллиевых бронз марок БрБ2, БрБНТ. Производством ручного искробезопасного инструмента не только из сплавов алюминия и меди, но и омедненного инструмента занимается ООО «Каиндл-Урал» (Россия) [3].

Покрытие обычного стального слесарно-монтажного инструмента слоем из неискрящегося материала, в частности меди, обеспечивает искробезопасность. Инструмент не дает искры при ударе, но поскольку толщина покрытия очень маленькая (не более 50 мкм), такой инструмент не применяется для интенсивных работ. Омедняется любой слесарно-монтажный инструмент, и вследствие невысокой стоимости процесса омеднения инструмент получается достаточно дешевым и пользуется популярностью. Только из-за низкой износостойкости, толщины покрытия и соответственно отсутствия 100 % гарантии обеспечения безопасности ограничен в использовании.

Опыт применения одно- и многокомпонентных диффузионно-легированных покрытий свидетельствует о перспективности направления применения покрытий диффузионного типа в качестве искробезопасных. В случае использования покрытий, легированных бором, кремнием, хромом и другими элементами, достигаются высокие показатели не только искробезопасности, но и износостойкости. Толщина получаемых слоев превышает толщину покрытий, полученных электролитическим способом, в 2...10 раз, технологический процесс более экологически чистый.

В Республике Беларусь методы контроля фрикционной искробезопасности технологических процессов в случае возникновения искр, инициируемых фрикционным контактом твердых материалов, изделий и оборудования, установлены стандартом СТБ 11.05.04-2007 «Система стандартов пожарной безо-

пасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методов контроля фрикционной искробезопасности». Стандарт прежде всего распространяется на фрикционные искры в узлах трения, где возникновение их не носит случайный характер. В европейском законодательстве для регулирования соответствующих требований применяется Директива 1999/92/ЕС (ATEX 137) и другие технические нормативно-правовые акты, в Российской Федерации – ГОСТ Р ЕН 13463-5-2003, ГОСТ 12.1.044-89 и т.д.

Как уже отмечалось, применение покрытий не обеспечивает самую долговременную работоспособность изделий. Если такой инструмент активно используется, защитный слой изнашивается. Однако, учитывая дороговизну и низкие прочностные свойства большинства рассматриваемых искробезопасных материалов, представляет интерес создание искробезопасных покрытий на поверхности стальных деталей, полученных диффузионным способом или наплавкой.

Известно, что высокая температура фрикционных искр обусловлена в первую очередь тепловыделением при их окислении кислородом воздуха. Если рассматривать температуру искр, образующихся при истирании образцов вращающимся абразивным кругом, то, как правило, она находится в пределах температуры плавления металлов. В то же время закономерным является и факт снижения температуры искр, когда при окислении образуются легкоплавкие оксиды.

Синтез наплавочного материала для искробезопасного покрытия стальных деталей нами осуществлялся посредством диффузионного легирования чугунной дроби. Для исследования была выбрана чугунная дробь ДЧЛ 08 ГОСТ 11964-81. Изучение гранулометрического состава проводили ситовым методом по ГОСТ 18318-73. Шлифы частиц и покрытий изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302-88. Параметры высокочастотного генератора ВЧГ2-100/0,066 для индукционной наплавки порошковой смеси следующие: накал – 13 В; ток на сетке – 1,6 А; анод – 7,5 А; анодное напряжение 10 кВ. Микроструктуры порошков и наплавленных покрытий изучали с помощью оптического металлографического микроскопа МИ-1. Микротвердость измеряли согласно ГОСТ 2999-75.

С целью удешевления разрабатываемого наплавочного материала на основе чугунной дроби ДЧЛ 08 нами использовались отходы металлургического производства. На первом этапе было проанализировано количество годной для последующей переработки в наплавочный материал фракции. Изучением гранулометрического состава выявлено 60 % годной фракции размером 200...630 мкм. Химический состав дроби ДЧЛ 08: 2,9...3,5 % С; 0,4...0,7 % Мп; 1,2...2,0 % Si; ≤ 0,12 % S и P. Исходная микроструктура чугунной дроби представляет собой ледебурит и дендритные включения перлита различной дисперсности. Распределение микротвердости по сечению дроби составляет 7730...8450 МПа, у поверхностного слоя твердость возрастает до 10240 МПа, что объясняется большой скоростью охлаждения поверхности при изготовлении и получении большего количества метастабильной фазы в поверхностном слое.

Микроструктура дроби после обработки (а) и полученный наплавленный слой (б) показаны на рисунке 1. Диффузионное легирование осуществлялось в подвижной порошковой среде [4; 5].

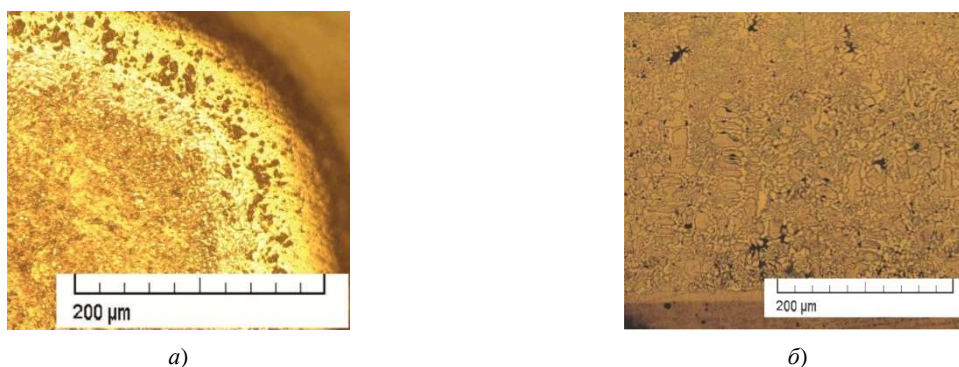


Рис. 1. Микроструктура дроби ДЧЛ08 после диффузионного легирования (а) и микроструктура покрытия (б)

Анализ дроби после диффузионного легирования показал, что в борированном слое присутствует цепочка графитных включений размером 6...10 мкм, предположительно из-за возникающих поверхностных пластических деформаций, а также из-за продолжительности обработки наблюдаются графитные включения размером 3...5 мкм в металлическом ядре порошокки. Борированный слой состоит из двух зон. Предположительно, это боридная зона с включениями графита и переходная зона, включающая в себя α -фазу, выделения борного цементита $Fe_3(C, B)$ и графита. Толщина слоя 100...130 мкм. Микротвердость поверхности порошокки составляет порядка 10500...11450 МПа и постепенно снижается к центру до 3670...4120 МПа. Смесь для наплавки изготавливали механическим смешиванием диффузионно-легированной дроби с плавкой бурой ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) в соотношении 1:1.

Наплавленный слой имеет участки доэвтектического, эвтектического и заэвтектического строения, что свидетельствует о достаточно большой продолжительности наплавки и медленной скорости охлаж-

дения наплавленного слоя [5]. Полученные толщины слоев составляют порядка 1,0...1,5 мм. Пористость полученных слоев составляет порядка 3...5 %.

Следует отметить тот факт, что во всех наплавленных слоях присутствует переходная зона между наплавленным слоем и основным металлом. Это свидетельствует о полном сплавлении наплавочного порошка с металлической основой.

Разработка составов искробезопасных материалов и покрытий с целью применения в производственных условиях обуславливает необходимость испытаний таких покрытий в специализированной лаборатории по СТБ 11.05.04-2007. Существующая методика оценки поджигающей способности в паровоздушных смесях не распространяется на узлы и детали горношахтного оборудования, а также на оборудование, для которого фрикционные искры являются характерными при эксплуатации и не носят случайный характер. Методика не позволяет моделировать режим соударения со значительной энергией удара, плохо подходит для выбора варианта покрытий в лабораторных условиях и для сопоставительного анализа различных вариантов покрытий, близких по характеристике искробезопасности.

Один из вариантов лабораторных испытаний для предварительного выбора покрытия – истирание образцов вращающимся абразивным диском. Образование искр в этом случае зависит от зернистости, твердости, скорости вращения диска, а также от силы, с которой образец прижимается к диску. В нашем случае испытания проводили на специальной лабораторной установке (рис. 2, а) для того, чтобы условия испытаний у всех образцов были одинаковы. Необходимо отметить, что искрообразование на стали 45 идет с яркими, в форме язычков, расщепленными на конце искрами и увеличенной яркостью в зоне сгорания (рис. 2, б).

Проведенные исследования показали, что при истирании образцов вращающимся абразивным кругом низкое искрообразование наблюдалось у борсодержащих покрытий, например, для борированных покрытий на стали 45 с температурой плавления $t_{пл} = 1389 \text{ }^\circ\text{C}$ (Fe_2B) и $1540 \text{ }^\circ\text{C}$ (FeB) и удельной теплоемкостью при нагреве менее $1,26 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ [6; 7] образовывался более короткий пучок искр, с малым количеством звездообразных разветвлений (рис. 2, в).

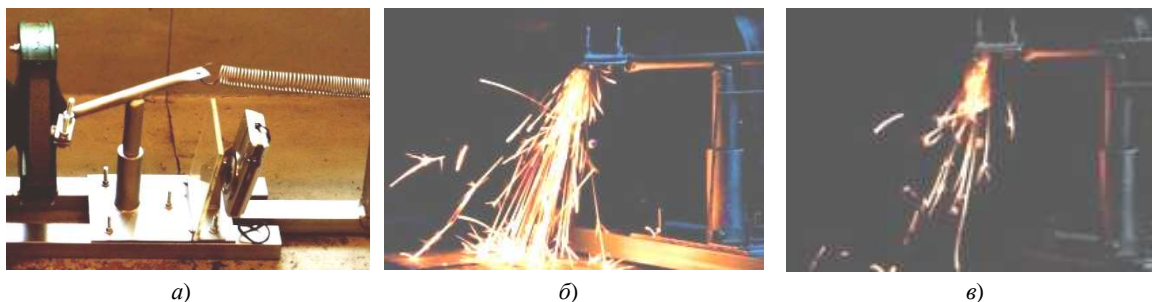


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки для испытаний на искрообразование (а); пучки искр, образующиеся при истирании вращающимся абразивным кругом образца стали 45 без покрытия (б); образец с диффузионным борированным покрытием (в)

Предполагаемый механизм окисления и горения частичек боридов представлен на рисунке 3.

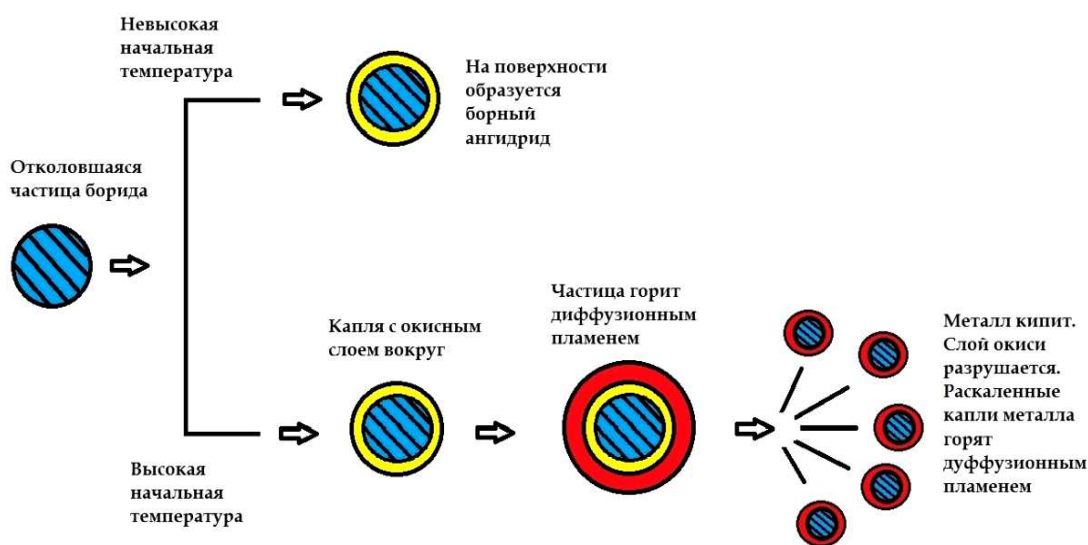


Рис. 3. Окисление частиц боридных диффузионных покрытий, образующихся при трении и соударении

По нашему мнению, наиболее вероятная причина резкого снижения количества искр с высокой температурой – образование при нагревании на воздухе борного ангидрида B_2O_3 с низкой температурой плавления (около 480 °С). Характерным фактором является высокая скорость образования такой оксидной пленки, поэтому при большом отношении площади поверхности к объему частицы скорость разогревания частицы идет медленно, что приводит, во-первых, к значительной потере тепла в окружающую среду посредством конвекции, во-вторых, к появлению на поверхности оксидной пленки значительной толщины.

Исследуемые покрытия в дальнейшем были подвергнуты испытаниям по методике СТБ 11.05.04-2007 в специализированной лаборатории НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, где моделирование процесса искрообразования происходило на установке, имитирующей режим трения и соударения пары «диск – пластина».

Заключение. В результате проведенных работ выполнены исследования искрообразования различных вариантов борсодержащих покрытий при истирании образцов вращающимся абразивным кругом. Такие покрытия имеют меньшее количество искр с высокой температурой, поскольку характерным является образование на поверхности частиц борного ангидрида B_2O_3 с низкой температурой плавления.

Проведенные исследования показали возможность использования отходов металлургического производства в качестве основы для производства диффузионно-легированного наплавочного материала, который после нанесения индукционным способом отличался высокой искробезопасностью.

Рассмотрен механизм окисления и горения частичек боридов, образовавшихся при фрикционном взаимодействии. Появление диффузионного пламени характерно лишь для высокой начальной температуры. Такие условия перехода механической энергии в тепловую характерны для очень сильных ударов.

По результатам испытаний согласно СТБ 11.05.04-2007 рассматриваемые борсодержащие покрытия были признаны искробезопасными и рекомендованы для применения в помещениях категории А по взрывопожарной и пожарной опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр / В.А. Бондарь [и др.]; под ред. В.С. Кравченко, В.А. Бондаря. – М.: Недра, 1976. – 304 с.
2. Розловский, А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами парами / А.И. Розловский. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
3. Взрывобезопасный инструмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.safetytool.ru/>. – Дата доступа: 06.05.2012.
4. Щербаков, В.Г. Анализ проблемных вопросов при производстве диффузионно-легированных наплавочных материалов в условиях РУП «МЗШ» / В.Г. Щербаков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т. Т. 1; под общ. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 44 – 46.
5. Опыт использования отходов металлической дробы для производства наплавочного сплава в условиях ПРУП «МЗШ» / В.М. Константинов [и др.] // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск: БНТУ, 2008. – С. 107 – 110.
6. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
7. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 444. – 1232 с.

Поступила 20.06.2013

FRICIONAL SPARK SAFETY OF BORON-CONTAINING DIFFUSION AND DEPOSITED SURFACE

V. DASHKEVICH, A. PIVOVARCHIK, V. SCHERBAKOV

The perspective of the use of diffusion processes for intrinsically safe materials is noted. The questions of sparking of boron coatings in grinding samples rotating abrasive wheel are considered. According to the test results a significant reduction of sparking is noted, which is associated with the formation on the surface of the heated particles of boride anhydride with low temperature of melting point. The mechanism of oxidation of boride particles separated from the surface of the diffusion coating at the frictional interaction is considered.

УДК 674.047.3+537.876

**НАГРЕВ И СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
В МАКЕТНОМ ОБРАЗЦЕ СВЧ-УСТАНОВКИ**

*канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ, О.А. КИЗИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты серии экспериментальных исследований нагрева и сушки штабеля пиломатериалов на разработанном макетном образце СВЧ-установки, оснащенной двумя магнетронами с рабочей частотой генерируемого СВЧ-поля 2,465 ГГц, разработанными целевыми излучателями, вытяжной вентиляцией и регулируемым поддоном. С применением тепловизионной съемки исследовано распределение температуры на поверхности штабеля при различном расположении в камере и угле наклона штабеля относительно целевых излучателей. Проведено исследование нагрева штабеля при попеременном и одновременном включении магнетронов. Рассматривается сушка штабеля энергией СВЧ-поля на разработанной установке. Дана оценка скорости сушки и удельных энергетических затрат; предложены рекомендации по размещению штабеля пиломатериалов в СВЧ-камере, снижению затрат СВЧ и потерь тепловой энергии на сушку пиломатериалов путем теплоизоляции камеры и оптимизации системы вентиляции.

Введение. Изготовление качественных изделий из древесины невозможно без проведения операции сушки. Широко известные технологии сушки древесины включают атмосферную, контактную, конвективную, индукционную, радиационную, инфракрасную, конденсационную сушку и др. [1]. Однако они не обеспечивают в полной мере требуемое качество высушенной древесины и высокую скорость сушильного процесса, повышение которой приводит к неравномерности распределения влагосодержания в сечении пиломатериалов, пересыханию наружных слоев, растрескиванию и короблению древесины.

Главное достоинство сушки древесины энергией СВЧ-поля состоит в обеспечении высокоскоростного объемного нагрева [2 – 5]. Возникающие при этом движение влаги и ее паров, градиент температуры постоянно направлены из внутренних слоев древесины к периферийным. Вследствие этого значительно уменьшается коробление и растрескивание лесоматериалов, сокращается продолжительность процесса сушки и повышается качество конечного продукта. Совмещение СВЧ-нагрева с принудительной конвекцией в камере позволит быстро и своевременно удалять с поверхности древесины влагу и дополнительно сократить время сушки.

Основная проблема в технологии СВЧ-сушки – получение равномерного распределения напряженности СВЧ-поля в объеме подвергаемых сушке пиломатериалов и, как следствие, их неравномерный нагрев, а также достаточно высокая энергоемкость процесса. Повышение равномерности нагрева достигается применением одно- или многомагнетронного возбуждения СВЧ-поля в камере, перемещением материала в камере, а также использованием щелевых, волноводно-щелевых и апертурных антенн, расчет которых в настоящее время хорошо разработан [4]. В [6] рассчитаны простые в изготовлении и эффективные щелевые излучатели и предложены к применению в лучевых камерах СВЧ-установок [7].

Постановка задачи и проведение экспериментальных исследований. Цель работы – исследовать распределение температуры на поверхности пиломатериалов при их сушке в камере с применением разработанных излучателей.

Исследования проводились на макетном образце установки СВЧ-сушки с камерой размерами 600×600×1000 мм, оснащенной двумя специально рассчитанными щелевыми излучателями, двумя магнетронами OM75S21 с полезной мощностью по 1 кВт каждый и рабочей частотой 2,465 ГГц, двумя высоковольтными источниками питания, вытяжной вентиляцией и металлическим поддоном с регулируемым наклоном и высотой установки, связанным штоком с измерителем веса (см. рис. 1).

Внешний вид изготовленного макетного образца установки СВЧ-конвективной сушки древесины показан на рисунке 1.

Проводилась серия экспериментов по нагреву и сушке пиломатериалов в СВЧ-установке для определения наиболее эффективного способа их укладки и расположения относительно излучателей, облечения и оценки скорости нагрева и сушки и т.д.

Для проведения исследований использовались увлажненные до 40...60 % сосновые доски длиной 450 мм, сечением 25×110 мм. Штабель пиломатериалов укладывался в один слой на поддон с зазором $\lambda / 4 = 122 \text{ мм} / 4 = 30 \text{ мм}$ и шириной шпаций не более 5 мм.

Съемка распределения температуры на поверхности штабеля в процессе проведения экспериментов осуществлялась тепловизионной камерой FLIR.

В процессе первой серии экспериментов производился нагрев штабеля при различном его расположении относительно излучателей и угле наклона поддона включением магнетронов в течение 5 минут, с последующей съемкой распределения температурного поля.

Следующая серия экспериментов проводилась для оценки различий нагрева штабеля при работе одновременно двух магнетронов в течение 5 минут и попеременном их включении в течение 10 минут. Для оценки скорости сушки штабеля производился циклический нагрев включением магнетронов на 10 минут и их отключением на 2 минуты. Общее время сушки заняло 7 циклов, или примерно 1,5 часа.

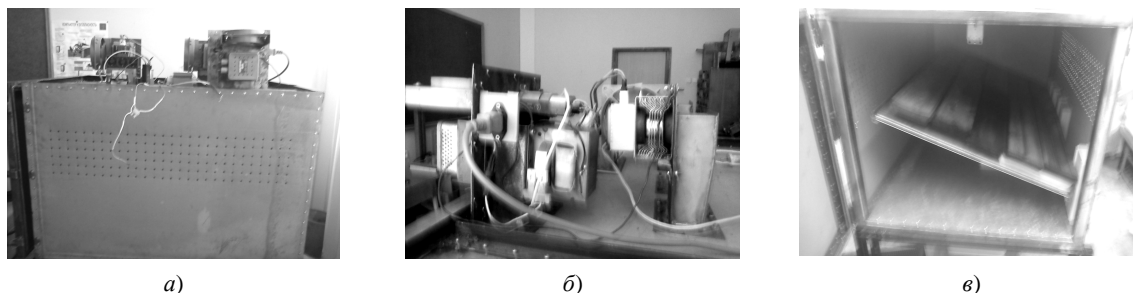


Рис. 1. Конструкция макетного образца технологической установки СВЧ-сушки:
а – общий вид; б – СВЧ-модуль; в – с загруженными пиломатериалами

Обсуждение результатов. Анализ результатов экспериментального цикла исследований позволил установить следующее:

1) наиболее равномерное распределение областей прогрева по поверхности пиломатериалов достигается при укладке досок таким образом, чтобы волокна древесины были ориентированы вдоль широкой стороны щели излучателей, что соответствует поперечной ориентации вектора напряженности E СВЧ-поля относительно волокон. Кроме того, известно, что при такой ориентации E глубина проникновения СВЧ-поля в древесину больше в 1,2...1,5 раза при меньшем коэффициенте отражения R . При ориентации вектора E вдоль волокон пиломатериалов наблюдался перегрев центральных зон с недостаточным прогревом штабеля по краям. При этом установлено, что наиболее эффективно располагать штабель пиломатериалов на расстоянии 200...300 мм от поверхности облучателя, а также под углом в 20...25 градусов. С уменьшением этого расстояния наблюдался перегрев центральной зоны, с увеличением – недостаточная скорость нагрева с резко выраженной неравномерностью;

2) эксперименты показали, что при попеременной работе магнетронов распределение температурного поля по поверхности пиломатериалов имеет несколько меньшую равномерность по сравнению с облучением от двух магнетронов одновременно при одинаковом расходе электроэнергии;

3) в начальный период сушки штабеля быстрее нагреваются области, расположенные ближе к источникам-излучателям (рис. 2).

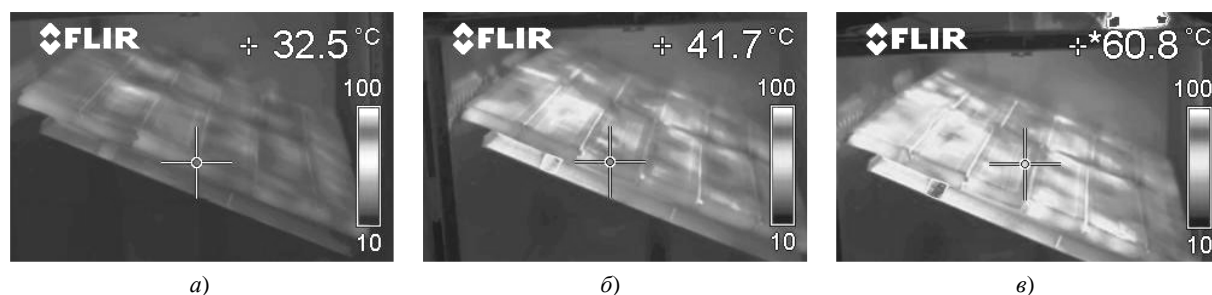


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности пиломатериалов при СВЧ-сушке:
а – через 10 мин; б – через 40 мин; в – через 70 мин

Затем температура на поверхности штабеля выравнивается как за счет теплопроводности влажной древесины, так и за счет изменения интерференционной картины СВЧ-поля и устанавливается в среднем на уровне 60...70 °С. В эксперименте по сушке штабеля, объем которого составил 0,03 м³, за 7 циклов сушки общей длительностью около 1,5 часа и подводимой мощностью 2 кВт было вытеснено около 1,7 кг влаги, или 56 кг влаги из 1 м³ древесины за указанное время при подводимой мощности 66 кВт/м³. Тогда ориентировочно средняя удельная скорость сушки составит 37 кг/ч на 1 м³ при расходе полезной энергии СВЧ-поля 100 кВт·ч (140 кВт·ч потребленной электроэнергии на 1 м³) высушиваемой древесины, или 9700 кДж на 1 кг удаленной влаги при теоретическом минимуме 2500 кДж/кг. Значительные затраты

электроэнергии на СВЧ-сушку древесины в макетном образце установки обусловлены преимущественно удалением нагретого влажного воздуха и притоком холодного воздуха из системы вентиляции, нагреванием металлических стенок камеры и ее элементов с последующей теплоотдачей в окружающую среду, а также невысоким коэффициентом полезного действия магнетронов – около 60...70 %.

Выводы:

1) при размещении пиломатериалов в камере установки предпочтительна поперечная ориентация вектора напряженности E относительно волокон древесины. Наклон пиломатериалов под углом к падающему полю позволит несколько повысить равномерность нагрева за счет уменьшения отражений СВЧ-поля от поверхности штабеля. Нагрев целесообразно проводить одновременно работающими магнетронами, что обеспечит более усредненное распределение поля и, соответственно, тепловыделения по штабелю за счет несинфазности и небольшого различия рабочих частот;

2) выбор расстояния от излучателей до штабеля осуществляется в зависимости от требуемой скорости нагрева, расстояния между соседними излучателями, учитывая их диаграмму направленности в ближней зоне излучения [6];

3) значительного снижения потерь возможно достичь теплоизоляцией стенок камеры, оптимизацией системы вентиляции и ее работы на разных стадиях сушки, использованием нагретого воздуха из системы охлаждения магнетронов в цикле сушки, а также сочетанием СВЧ-нагрева с конвективным способом;

4) разработанный макет установки СВЧ-сушки древесины с указанными доработками, дополнительно оснащенной автоматизированной системой управления, может найти применение для малых деревообрабатывающих производств и мастерских для быстрой и качественной сушки деревянных заготовок, короткомерных пиломатериалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пейч, Н.Н. Сушка древесины: учебник для проф.-техн. училищ и подготовки рабочих на производстве / Н.Н. Пейч, Б.С. Царев. – 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1971. – 220 с.
2. Рахманкулов, Д.Л. Применение микроволнового излучения для сушки дерева и пиломатериалов / Д.Л. Рахманкулов, С.Ю. Шавшукова, И.Н. Вихарева // Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 46 – 52.
3. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины / Ф.Х. Гареев // ЛесПромИнформ. – 2004. – № 1(14). – С. 50 – 52.
4. Шавшукова, С.Ю. Исторические этапы развития микроволновой техники для научных исследований и промышленных процессов: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 07 00 10 / С.Ю. Шавшукова; НИИ малотоннажных химических продуктов и реактивов ГОУ ВПО «Уфимск. гос. ун-т». – Уфа, 2008. – 48 с.
5. Сушка бревен без трещин / Ф.Х. Гареев // ЛесПромИнформ. – 2004. – № 4(17). – С. 58 – 60.
6. Излучатель для лучевой камеры СВЧ-нагрева и сушки материалов / А.Л. Адамович [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. Промышленность. – 2012. – № 11. – С. 19 – 23.
7. СВЧ-установка для термообработки материалов: пат. 7041 U BY, МПК 8 F 26B 3/00, H 05B 6/64 / А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, О.А. Кизина; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u 20100654; заявл. 19.07.2010; опубл. 16.11.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4(46). – С. 253.

Поступила 20.06.2013

STUDY OF HEAT AND DRYING OF LUMBER IN PROTOTYPICAL MODEL OF MICROWAVE UNIT

A. ADAMOVICH, YU. GROZBERG, O. KIZINA

Results of a series of experimental studies of heat and drying of stacks of lumber on the developed prototype model of microwave unit equipped with two magnetrons with a working frequency of the generated microwave field 2.465 GHz, designed slot radiators, exhaust ventilation and adjustable tray are shown. Using thermal recording investigated the temperature distribution on the surface of the stack at a different location in the chamber and relative inclination of the stack slot radiators are studied. The study of heat of a stack at alternate and simultaneous inclusion of magnetrons is carried out. The recommendations on the placement of piles of lumber in the microwave chamber, reducing costs and losses of the microwave heat for drying of lumber by thermal insulation of cameras and optimization of the ventilation system are given.

УДК 666.961

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ С ПОГРУЖЕННЫМ СОПЛОМ

В.В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, проф. П.П. ЕРМАКОВ

(Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск);

канд. техн. наук О.А. ПЕТРОВ, канд. техн. наук, доц. В.Н. ПАВЛЕЧКО

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Представлена исследовательская кавитационная установка и методика обработки экспериментальных данных изучения процесса кавитации с погруженным соплом. Предложены варианты выполнения отдельных пунктов методики обработки экспериментальных данных в зависимости от количества обрабатываемых экспериментов. Разработана программа для автоматизации процесса обработки экспериментальных данных. Рассмотрены особенности математической обработки результатов исследований. Сделан вывод о том, что предложенная методика позволяет проводить тщательные многофакторные исследования процесса кавитации.

Введение. Кавитация – явление возникновения в жидкости паровых, газовых или парогазовых пузырьков из зародышей под действием локальных низких давлений с возможным последующим их схлопыванием. Исследования в области кавитации проводятся как с целью уменьшения ее разрушительного воздействия на элементы деталей машин [1 – 3], так и интенсификации с ее помощью различных процессов химической технологии [4; 5].

Широкое применение кавитации в промышленности обуславливает необходимость дальнейших научных исследований этого явления как с фундаментальной, так и с прикладной стороны.

Основная часть. Для проведения исследований была создана экспериментальная кавитационная установка с погруженным соплом, схема которой представлена на рисунке 1.

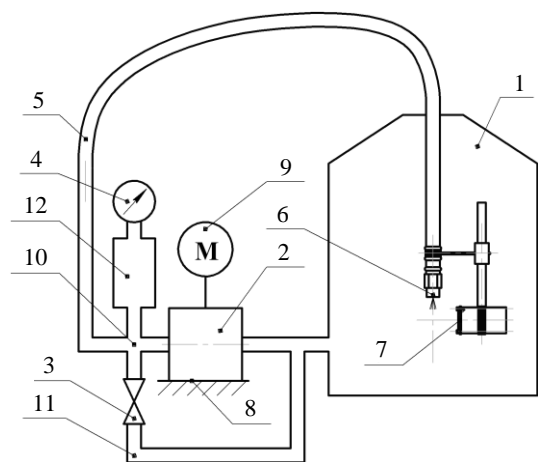


Рис. 1. Общий вид кавитационной установки:
1 – буферная емкость; 2 – шестеренный насос;
3 – вентиль; 4 – манометр; 5 – напорный трубопровод;
6 – кавитационное сопло; 7 – датчик; 8 – плита;
9 – двигатель; 10 – распределительный узел;
11 – трубопровод сброса; 12 – компенсатор давления

Установка работает следующим образом. Жидкость из буферной емкости 1 всасывается шестеренным насосом 2, из которого под давлением, задаваемым вентилем 3 и измеряемым манометром 4, подается через напорный трубопровод 5 в кавитационное сопло 6. В кавитационном сопле 6 жидкость значительно ускоряется, и в ней начинают расти кавитационные пузырьки. После выхода из сопла кавитационные пузырьки схлопываются, а импульсы давления, которые при этом возникают, фиксируются датчиком 7 на базе пьезоэлектрического элемента и передаются на компьютер в виде осциллограммы. По амплитуде колебаний в осциллограмме оценивается интенсивность кавитационного поля в данной точке пространства.

Такие акустические исследования позволяют проводить большое количество опытов и, таким образом, получать полную информацию об исследуемом процессе. После выхода из сопла жидкость определенный промежуток времени находится в буферной емкости 1, при этом перемешиваясь. Затем она снова попадает в шестеренный насос 2 через всасывающий патрубок. Таким образом, осуществляется циркуляция с многократной обработкой жидкости.

Сигнал с датчика снимается цифровым осциллографом BM8020, превращается в цифровой вид и передается на компьютер (рис. 2). На компьютере сигнал визуализируется и записывается в файл «*.dat» с помощью программы USB DiSCO 3.14, которая поставляется вместе с вышеуказанным осциллографом. Последующие действия целесообразно выполнять не во время проведения опытов, а в любое удобное время. Каждая осциллограмма перезаписывается в формате «*.txt», после чего она пригодна для обработки средствами математического пакета MathCad или другого.

Следует отметить, что конвертация файлов из формата «*.dat» в формат «*.txt» может осуществляться двумя способами. В первом способе конвертация осуществляется непосредственно в интерфейсе программы USB DiSCO 3.14, который представлен на рисунке 3.

Преимущество такого способа – возможность предварительной визуальной оценки параметров каждой обрабатываемой осциллограммы. Существенный недостаток – невысокий уровень автоматизации этого этапа обработки и, как следствие, большая доля ручного труда. Данный способ целесообразен при проведении предварительных поисковых экспериментов, в которых количество опытов невелико (ориентировочно до 50 опытов), и может отсутствовать четкая систематизация условий проведения опытов.



Рис. 2. Схема обработки сигнала датчика

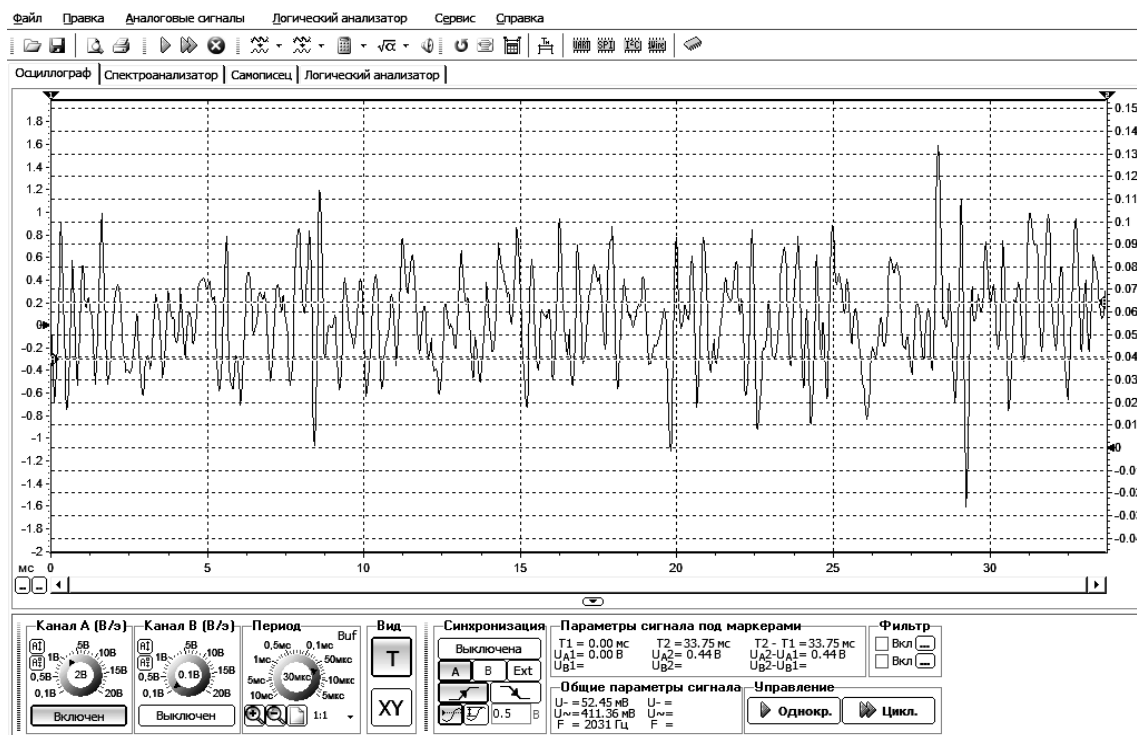


Рис. 3. Интерфейс программы USB DiSCO 3.14

Второй способ заключается в использовании разработанной нами специализированной вспомогательной программы DO Konvertor. Программа написана специально для массовой конвертации файлов из формата «*.dat» в формат «*.txt». Интерфейс программы представлен на рисунке 4. При использовании специализированной программы DO Konvertor почти полностью автоматизируется этап конвертирования файлов. Также значительно увеличивается скорость конвертации. При этом исключается возможность предварительного анализа каждой осциллограммы. Предварительный анализ возможен только для пер-

вой осциллограммы из списка, который конвертируется. Такой способ целесообразен для конвертации большого количества осциллограмм при проведении обширных опытов со строгой системой расположения экспериментальных точек и системой имен файлов осциллограмм.

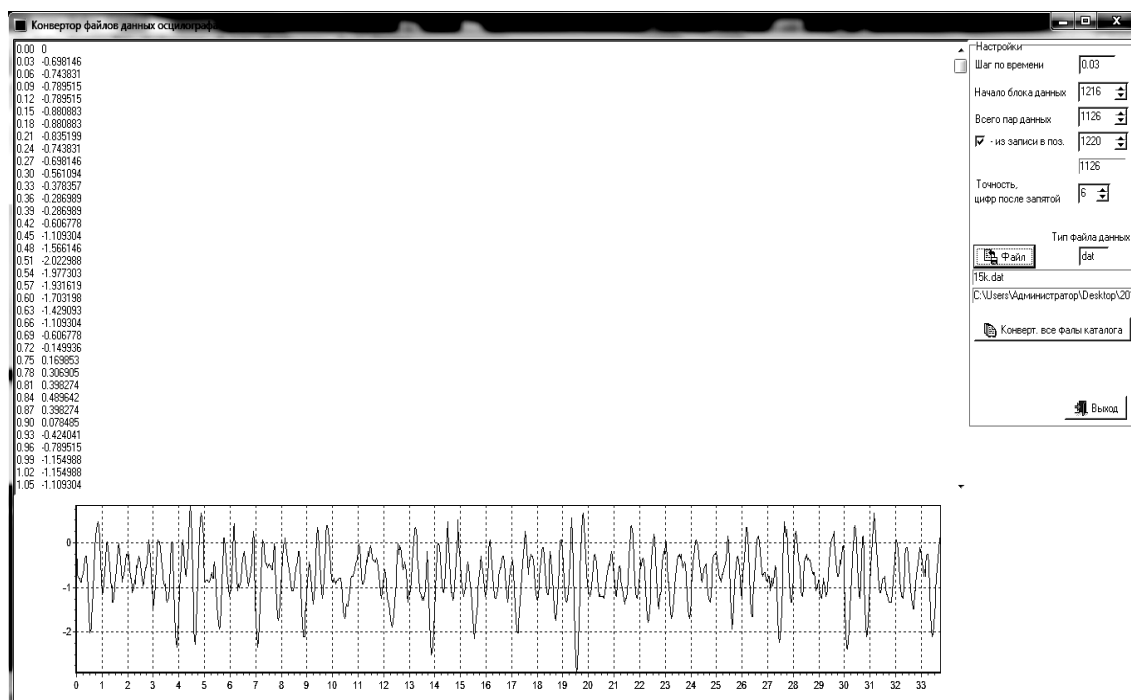


Рис. 4. Интерфейс программы DO Konvertor

Обработка в MathCad проводится в две стадии: комплексная обработка каждой отдельной осциллограммы и анализ всех экспериментальных данных с построением необходимых графиков и выполнением необходимых расчетов.

Комплексная обработка осциллограммы сигнала от датчика включает: *стандартизацию сигнала* (приведение количества точек в осциллограмме до 1024); *отбрасывание влияния колебаний*, заранее нехарактерных для кавитации; *симметризацию осциллограммы* относительно оси времени; *вычисление величины сигнала* в виде одного числа.

Таким образом, при комплексной обработке вся осциллограмма сводится к одному значению, которое характеризует величину сигнала от датчика в данном опыте. Именно это значение принимает участие во второй части математической обработки экспериментальных данных.

Порядок комплексной математической обработки осциллограммы следующий.

Файл с осциллограммой в формате «*.txt» импортируется в MathCad. Типовая осциллограмма необработанного сигнала датчика представлена на рисунке 5.

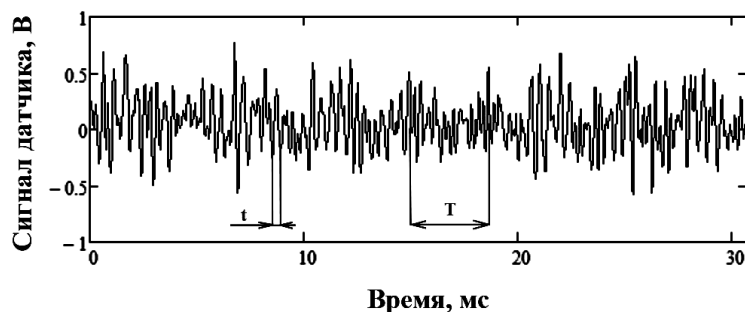


Рис. 5. Типовая осциллограмма в необработанном виде

Видно, что типовая осциллограмма содержит одновременно колебания разных частот. Кавитационные колебания имеют высокие частоты (ориентировочно от 1000 Гц) и период, близкий к t . Кроме кавитационных колебаний на осциллограмму попадают колебания другой природы (например, колебания от неравномерности подачи жидкости насосом с периодом T). Для отбрасывания некавитационных

колебаний применяется преобразование Фурье [6], в результате которого становится четко видно границу между кавитационными и другими колебаниями (рис. 6). Обработанная преобразованием Фурье осциллограмма симметризуется относительно горизонтальной оси (оси времени).

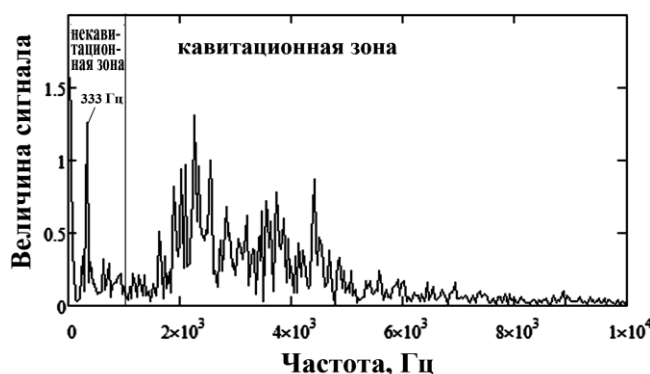


Рис. 6. Типичный спектр сигнала от датчика

указывает файл для импорта, а программа выдает рассчитанную величину сигнала датчика. Это позволяет, один раз настроив программу, быстро выполнять обработку большого количества осциллограмм. Рекомендуемое максимальное количество точек в плане эксперимента, учитывая наличие автоматизированной обработки, составляет около 125. При количестве точек больше нескольких сотен их обработка становится трудоемкой, поэтому в таких случаях целесообразно использование модификации вышеописанной программы, предназначенной для пакетной обработки данных. При этом исследователь обрабатывает одновременно несколько (12, 32 и т.д.) точек, за счет чего скорость обработки всего количества опытов значительно сокращается и рекомендуемое количество опытов может быть увеличено до нескольких тысяч. При такой пакетной обработке необходимо введение точной системы имен файлов осциллограмм.

Заключение. Вышерассмотренная кавитационная установка при использовании соответствующей методики обработки экспериментальных данных позволяет проводить тщательные многофакторные исследования процесса кавитации. Это обеспечивается как конструкцией установки, так и автоматизированной методикой обработки результатов опытов. Разработано несколько вариантов выполнения отдельных пунктов методики, которые позволяют наиболее эффективно обрабатывать экспериментальные данные в необходимом количестве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин, В.Я. Износ лопастных гидравлических машин от кавитации и наносов / В.Я. Карелин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
2. Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
3. Рождественский, В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
4. Смородов, Е.А. Физика и химия кавитации / Е.А. Смородов, Р.Н. Галиахметов, М.А. Ильгамов. – М.: Наука, 2008. – 228 с.
5. Петров, О.А. Исследование и моделирование гидродинамических кавитаторов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехнович // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 12. – С. 52 – 56.
6. Макаров, Е.И. Инженерные расчеты в MathCad 14 / Е.И. Макаров. – Питер, 2007. – 592 с.

Поступила 31.07.2013

FEATURES OF A TECHNIQUE OF PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA TO EXAMINE THE PROCESS OF CAVITATION WITH SUBMERGED NOZZLE

V. ANISIMOV, P. YERMAKOV, O. PETROV, V. PAVLECHKO

The research of cavitation equipment and methods for processing of experimental-mental data to examine the process of cavitation with submerged nozzle is presented. The options for fulfillment of individual points of a technique of processing of experimental data according to the number of processed experiments is proposed. A programme to automate the process of processing of experimental data is developed. The peculiarities of mathematical processing of results of research is considered. It is concluded that the proposed technique allows to carry out thorough multi-factor research of the process of cavitation.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.76

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В БЕНЗИНЕ-РАСТВОРИТЕЛЕ, ПОДАВАЕМОМ НА СТАДИИ ОЧИСТКИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ, НА КОЛЛОИДНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЩЕЛОЧНОЙ СУЛЬФОНАТНОЙ ПРИСАДКИ В МАСЛЕ

канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ, А.В. ЗАВАДСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается вопрос повышения коллоидной стабильности высокощелочных детергентных присадок к смазочным маслам путем оптимизации состава бензина-растворителя, подаваемого на стадии очистки присадки от механических примесей, представленного концентратом кальциевых соединений. Приведены результаты исследований влияния содержания ароматических углеводородов в составе растворителя на коллоидную стабильность. Предложено объяснение влияния содержания ароматических углеводородов в растворителе на стабильность дисперсии с позиций физико-механики дисперсных систем. Показано, что с увеличением содержания ароматики в бензине-растворителе после стадии очистки от механических примесей коллоидная стабильность масел с присадками снижается. С целью повышения качества продуктов рекомендовано проводить очистку присадки на растворителе, содержащем менее 10 % масс. суммарных ароматических углеводородов, что позволит получить продукт с коллоидной устойчивостью в масле более 89 %.

Введение. В настоящее время разработано немало различных марок моторных масел для двигателей, эксплуатируемых в условиях разной степени форсированности. Для обеспечения работы стандартных исправных двигателей достаточно использования стандартных моторных масел. Если бы автомобильный двигатель эксплуатировался в условиях, близких к идеальным, при абсолютно исправном состоянии топливной системы, газораспределения и системы сжигания, то существовала бы возможность эксплуатации масел без применения дополнительных присадок при рекомендуемых сроках замены для больших пробегов. Однако техническое состояние двигателя, как и остальных рабочих механизмов автомобиля, не всегда соответствует желаемому. Нередко механизмы эксплуатируются в условиях более жестких, чем это возможно для обеспечения их нормальной работы. Впоследствии все это может привести, например, к ухудшению теплоотвода от нагруженных пар трения, избыточным отложениям на поверхности поршневых колец или стенках цилиндров, к общему износу механизмов.

С целью продления срока работоспособности двигателя в современные моторные масла вводят присадки различного функционального назначения. Присадки в маслах выполняют три основные функции:

- восстанавливают свойства масел, утраченные или ослабленные в процессах очистки;
- улучшают первоначальные свойства масляной основы;
- придают маслам новые свойства, которыми масла первоначально не обладали [1, с. 128 – 130].

Присадки относятся к наукоемкой продукции, характеризующейся тем, что затраты на разработку сопоставимы с затратами на организацию их промышленного производства. Потребительские свойства этой продукции непрерывно возрастают, поэтому она имеет более высокую цену на мировом рынке по сравнению с другими нефтепродуктами [2, с. 12].

В настоящее время и в перспективе большое внимание со стороны производителей масел уделяется повышению качества и расширению ассортимента отечественных присадок. Одной из немаловажных задач, стоящих сейчас перед белорусскими и российскими производителями масел, является улучшение качества смазочных масел с целью обеспечения длительной и безотказной работы транспорта, технологического оборудования и современных энергетических установок.

Для получения масел и топлив оптимального углеводородного состава и с высокими эксплуатационными показателями требуются в первую очередь подбор высококачественного сырья и усовершенствование технологии производства базовых основ. Однако коренное решение проблемы немислимо без применения присадок как наиболее прогрессивного и экономически выгодного способа получения высококачественных масел и топлив. Присадки – это вещества, усиливающие положительные природные свойства базовых масел или придающие им необходимые новые свойства, если присадки добавлены в необходимом количестве и оптимальном сочетании. Передозирование присадок или их нерациональное сочетание приводит к отрицательным последствиям [3, с. 15 – 21].

Товарные масла, как и большинство продуктов нефтеперерабатывающей промышленности, имеют регламентированные показатели качества и обладают рядом специфических эксплуатационных свойств. С целью получения тех или иных марок масел в масляную базовую основу вводят добавки и присадки, не все из которых одинаково растворимы в масле. Для обеспечения физической гомогенности эти компоненты вводят в масло в тонкодисперсном состоянии, образуя тем самым коллоидный раствор. Нарушение устойчивости подобного коллоидного раствора, вызванное, как правило, коагуляцией диспергированных частиц, приводит к выпадению присадки в осадок и изменению качества масла при хранении, что в свою очередь ухудшает эксплуатационные свойства масел [4, с. 45 – 72].

Поиск путей улучшения качества моторных масел осуществляется в основном расширением использования ассортимента присадок. Однако в настоящий момент составление рецептуры пакетов присадок и их дозировка в масляную базовую основу определяются чаще функциональным действием присадок. При этом не всегда учитывается тот факт, что при совместном присутствии различных присадок происходят изменения в межмолекулярных взаимодействиях растворов присадок в масле, и не всегда учитывается запас растворимости присадок в той или иной базовой основе. Все это в конечном счете приводит к ухудшению показателей качества, прежде всего так называемой коллоидной стабильности масел с присадками. Зачастую не берется во внимание последовательность введения компонентов пакетов присадок, режимы перемешивания.

Такие недочеты приводят к тому, что в условиях эксплуатации и хранения ухудшается седиментационная устойчивость товарных масел, и часть присадок может осаждаться из масляного раствора, образуя осадок. Последствия подобных явлений разнообразны по характеру: ухудшение фильтруемости масел, забивание фильтров и пр., а в целом – ухудшение эксплуатационных свойств. Поэтому одним из приоритетных направлений совершенствования качества присадок и пакетов присадок для моторных масел является повышение их коллоидной стабильности [5, с. 94 – 128].

Однако для достижения требуемого качества присадки необходимо совершенствование технологии производства продукта:

- оптимизация дозировки и порядка ввода компонентов в реакционную смесь;
- организация более глубокой и совершенной очистки присадок от примесей;
- выбор более эффективных растворителей, подаваемых на различных стадиях технологии получения присадок;
- применение высокотехнологичных методов воздействия на коллоидное состояние дисперсий присадок в масле [6, с. 109 – 113].

С целью повышения коллоидной стабильности высокощелочных сульфонатных детергентов предлагается оптимизировать химический состав растворителя, подаваемого на стадии очистки сульфонатных присадок от концентрата кальциевых соединений, что позволит осуществить более глубокую очистку присадки от примесей, тем самым оказывать влияние на стабильность дисперсии.

Для сохранения стабильности в масле присадки должны минимально «реагировать» на изменения внешних воздействий, изменяющие их межмолекулярные взаимодействия в объеме масла. Большинство детергентных присадок имеют дифильную структуру. Полярная группа (гидрофильная) определяет функциональное действие присадки, а неполярная (гидрофобная) – растворимость в масле. Таким образом, неполярные группы должны обеспечивать присадке максимально возможный запас растворимости, в особенности в процессе эксплуатации масла, в течение которого происходят изменения вязкости масла, накопление продуктов окисления, вызывающих ассоциацию присадок. Повышение полярности дисперсионной среды приводит к уменьшению ассоциации продуктов окисления, накапливающихся в процессе эксплуатации масел, а также к увеличению растворимости присадок в масле, что приводит к повышению коллоидной стабильности.

После проведения стадии карбонатации полученный высокощелочной детергент представляет собой дисперсию карбоната кальция, стабилизированного в масле частицами алкилбензосульфоната. Однако такая дисперсия не стабильна, поэтому с целью повышения коллоидной стабильности присадки осуществляют стадию очистки алкилбензосульфоната от механических примесей, представленных концентратом кальциевых соединений. На производстве очистка осуществляется в аппаратах циклонного типа и центрифугах. С целью повышения разделяющей способности перед очисткой алкилбензосульфонат разбавляют бензином-растворителем. В настоящий момент актуален вопрос: будет ли конечный результат очистки продукта зависеть от химического состава растворителя и как это отразится на коллоидной стабильности очищенного сульфоната.

Методы исследований. Для изучения эффективности и целесообразности оптимизации состава растворителя, подаваемого на стадии очистки детергентных присадок от механических примесей, с целью повышения устойчивости коллоидных систем в качестве объектов исследования взяты образцы высокощелочного сульфоната кальция, синтезированные в лаборатории СООО «ЛЛК-НАФТАН» на основе синтетической алкилбензосульфокислоты фирмы «HUNTSMAN» (Голландия). Объекты исследования

характеризуются как детергентные присадки к маслам, нейтрализующие свойства которых численно выражаются щелочным числом (> 300 мг КОН/г), стабильность продукта численно выражается показателем «коллоидная устойчивость присадки в масле».

Согласно нормативным требованиям к высокощелочным сульфонатным присадкам коллоидная устойчивость присадки в масле должна быть не ниже 85 % (Промышленный технологический регламент по процессам производства сульфонатных присадок СООО «ЛЛК-НАФТАН»). Коллоидную устойчивость дисперсной системы определяли фотокалориметрическим методом по методике, приведенной в [7]. С целью изучения влияния химического состава бензина-растворителя на коллоидную стабильность конечного продукта была проведена серия экспериментов. Исследование влияния состава растворителя на стабильность присадок в масле выполнялось последовательно в несколько этапов:

- контроль качества исследуемых растворителей, определение химического состава бензинов с разным содержанием ароматических соединений;
- приготовление образцов растворителей с разным содержанием ароматических углеводородов;
- приготовление растворов полученного на первом этапе работы высокощелочного сульфоната кальция растворителями с различным содержанием ароматических соединений с целью проведения стадии очистки;
- очистка высокощелочного сульфоната кальция от концентрата кальциевых соединений;
- отгонка бензина-растворителя от очищенного продукта;
- определение коллоидной стабильности присадки в масле после очистки с применением растворителей с различным содержанием ароматических соединений;
- анализ результатов эксперимента и рекомендации по проведению очистки присадки от концентрата кальциевых соединений.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе эксперимента были выбраны два растворителя, состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1

Углеводородный состав образцов бензина-растворителя

Состав	Содержание, % масс.	
	растворитель № 1	растворитель № 2
Парафины	83,77	93,94
Бензол	0,01	отсутствует
Толуол	6,67	2,25
Этилбензол	2,95	0,86
Параксиллол	2,17	0,90
Метаксиллол	3,90	1,73
Ортоксиллол	0,37	0,30
Σ ароматика C ₉₊	0,07	0,01
Σ ароматика C ₁₀₊	0,09	отсутствует

Из таблицы видно, что суммарное содержание ароматических соединений в первом из растворителей выше, чем во втором. Таким образом, растворитель № 2 является менее полярным по отношению к растворителю № 1. Для оценки влияния содержания ароматических соединений в бензине-растворителе на коллоидную стабильность присадки в масле выбран высокощелочной сульфонат кальция. Для исследования взят сульфонат кальция, не подвергавшийся предварительной очистке от концентрата кальциевых соединений. Образец сульфоната разбавляли растворителями № 1 и № 2 в соотношении сульфонат : растворитель, равном 47 : 53 (% масс.), после чего оба раствора были подвергнуты очистке от механических примесей на лабораторной центрифуге при следующих условиях работы оборудования: 7000 об./мин, RCF = 5150 в течение 30 минут. Затем на роторном испарителе от очищенного сульфоната отогнали растворитель. Для полученных образцов сульфоната определена коллоидная стабильность присадки в масле согласно методике [7]. Результаты анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения коллоидной устойчивости присадки в масле после очистки сульфонатной присадки двумя различными растворителями

Показатель	Растворитель № 1			Растворитель № 2		
	№ опыта			№ опыта		
	1	2	3	1	2	3
Коллоидная устойчивость присадки, %	85	87	87	93	92	90

С целью изучения влияния химического состава в ходе эксперимента приготовлен ряд растворов с различным содержанием ароматических соединений путем разбавления растворителя № 2 фракцией суммарных ксилолов. Состав полученных растворов приведен в таблице 3.

Таблица 3

Углеводородный состав полученных растворов

Состав	Растворитель № 3	Растворитель № 4	Растворитель № 5	Растворитель № 6
Парафины, % масс.	80	60	50	35
Суммарные ксилолы, % масс.	20	40	50	75

Далее были приготовлены растворы сульфоната кальция в растворителях № 3...№ 6 в соотношении сульфонат : растворитель 47 : 53 (% масс). Затем растворы были подвергнуты очистке на лабораторной центрифуге и отгонке бензина-растворителя при тех же условиях, что и растворы сульфонатной присадки в растворителях № 1 и № 2. Для полученных образцов присадки определена коллоидная стабильность в масле согласно методике [7]. Результаты анализа приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты определения коллоидной устойчивости присадки в масле после очистки сульфонатной присадки растворителями

Показатель	Растворитель № 3		Растворитель № 4		Растворитель № 5		Растворитель № 6	
	№ опыта		№ опыта		№ опыта		№ опыта	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Коллоидная стабильность в масле	88	86	83	83	79	80	77	74

С целью построения зависимости коллоидной устойчивости присадки в масле от содержания ароматических углеводородов в растворителе были приготовлены дополнительные растворители, состав которых приведен в таблице 5.

Таблица 5

Углеводородный состав полученных растворов

Состав	Растворитель № 7	Растворитель № 8	Растворитель № 9	Растворитель № 10
Парафины, % масс.	90	70	65	55
Суммарные ксилолы, % масс.	10	30	35	45

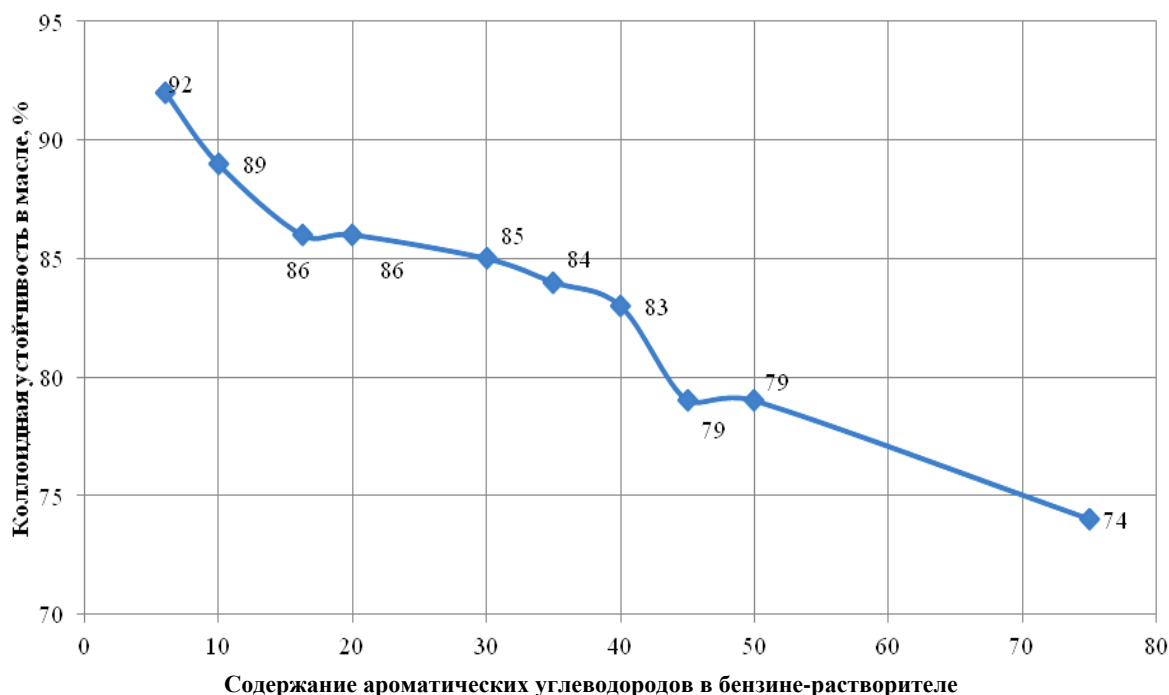
Затем были приготовлены растворы сульфоната кальция в растворителях № 7...№ 10 в соотношении сульфонат : растворитель 47 : 53 (% масс.). Растворы были подвергнуты очистке на лабораторной центрифуге и отгонке бензина-растворителя при тех же условиях, что и растворы сульфоната в растворителях № 1...№ 6. Для полученных образцов сульфонатной присадки была определена коллоидная стабильность в масле согласно методике [7]. Результаты анализа приведены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты определения коллоидной устойчивости присадки в масле после очистки сульфонатной присадки растворителями

Показатель	Растворитель № 7		Растворитель № 8		Растворитель № 9		Растворитель № 10	
	№ опыта		№ опыта		№ опыта		№ опыта	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Коллоидная стабильность в масле	89	88	85	85	85	83	77	79

По полученным результатам построена графическая зависимость коллоидной стабильности высокощелочной сульфонатной присадки от содержания ароматических соединений в бензине-растворителе. Полученная зависимость представлена на рисунке.



Зависимость коллоидной стабильности полученного высокощелочного сульфоната кальция в масле от содержания ароматических углеводородов в бензине-растворителе

Из приведенных результатов (см. рисунок) видно, что с увеличением содержания ароматических углеводородов в составе бензина-растворителя коллоидная стабильность масел с присадками падает.

Подобные результаты можно объяснить следующим образом. Механические примеси, отделяемые от присадки на стадии очистки, представляют собой не что иное, как концентрат кальциевых соединений, который не может удержаться в составе мицелл, образуемых на стадии карбонатации функциональной частью присадки и различными кальциевыми соединениями, имеющими выраженную полярную природу. С увеличением содержания ароматических соединений в растворителе возрастает его полярность, а вместе с тем и растворимость кальциевых соединений в смеси масло-присадка-растворитель. Это в свою очередь осложняет отделение механических примесей от раствора присадки и приводит к неполному их выделению. Однако после отгона растворителя полярность раствора присадки снижается, что приводит к уменьшению растворимости кальциевых соединений в растворе и, как следствие, падению коллоидной стабильности масел с присадками.

Таким образом, применение бензина-растворителя с низким содержанием ароматических углеводородов позволяет интенсифицировать стадию очистки от механических примесей и повысить эксплуатационные свойства масел с присадками. С целью повышения качества продуктов рекомендовано проводить очистку присадки на растворителе, содержащем менее 10 % масс. суммарных ароматических соединений, что позволит получить продукт с коллоидной устойчивостью в масле более 89 %.

Заключение. Внедрение результатов данного исследования в производство присадок в промышленном масштабе позволит:

- повысить коллоидную стабильность высокощелочных детергентов в масле;
- улучшить качество пакетов присадок к маслам и товарных моторных масел.

Повышение коллоидной стабильности присадок обусловит сокращение энергозатрат и повышение производительности установки вследствие уменьшения нагрузки на блок очистки присадок от концентрата кальциевых соединений, устранив необходимость в «переочистке» присадки и позволит достичь желаемого уровня механических примесей в продукте.

Вопросы производства присадок к смазочным маслам являются одними из наименее изученных вопросов нефтехимического синтеза.

Повышение коллоидной стабильности присадок и пакетов на их основе – задача многогранная, решение которой требует комплексного и системного подхода. Дальнейшее исследование поставленной задачи необходимо вести с точки зрения физико-механики дисперсных систем, рассматривая раствор присадки в масле как коллоидную систему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулиев, А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А.М. Кулиев. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
2. Кулиев, А.М. Синтез, технология и применение присадок к смазочным маслам / А.М. Кулиев, А.Б. Кулиев, Ф.Ю. Алиев // Тез. докл. III Всесоюз. конф., Москва, 1982. – Вып. 1 / ЦНИИЭнефтехим. – М., 1982. – С. 248.
3. Artur, T.N. Handbook of Detergent / T.N. Artur. – California: Santa Barbara Science Project, CRC Press. Taylor and Fransis Group, 2007. – 595 p.
4. Гарун, Я.Е. Присадки к смазочным маслам / Я.Е. Гарун, О.Л. Главати // Труды ИХП АН АзССР. – Баку, 1974. – Вып. 3. – С. 320.
5. Dawson, C.H. Producing of the high-basic detergent additives for engine oils / C.H. Dawson. – Amer.Chem.Soc, 1979. – 332 p.
6. Ультразвуковая кавитационная обработка коллоидных систем смазочных материалов / С.В. Покровка [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2012. – № 3. – С. 109 – 113.
7. Кирко, С.А. Методика оценки коллоидной устойчивости присадок и пакетов присадок / С.А. Кирко, М.О. Бабушкин. – ООО «ЛЛК-НАФТАН», 2007. – 10 с.

Поступила 10.07.2013

THE INFLUENCE OF AROMATIC COMPOUND CONTENT INTO BENZINE-SOLVENT SUPPLIED AT THE STAGE OF ADDITIVE REFINEMENT FROM MECHANICAL IMPURITIES ON COLLOIDAL STABILITY OF ADDITIVE IN OIL

S. POKROUSKAUA, A. ZAVADSKY

The article is devoted to resolving of the problem of colloidal stability increasing in relation to high-based detergent additives for engine oils by means of optimization of benzene-solvent composition supplied at the stage of its refinement from mechanical impurities represented by calcium compound concentrate. There are results of the investigation of influence of aromatic compound content consisting of the solvent on colloidal stability. There is an explanation of aromatic content influence on colloidal stability of dispersion from physico-chemical mechanic of dispersion systems point of view. It is achieved that the higher aromatic compound content in benzene-solvent after its refinement from mechanical impurities is – the less colloidal stability of the oils with additives is. To increase the quality of the products it is recommended to purify the additive by solvents, containing less than 10 % of total aromatic hydrocarbons, which will allow to obtain the product with colloidal stability in oil more than 89 %.

УДК 621.436:662.6

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ВИДА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ЭТАНОЛА**

*д-р техн. наук, проф. А.Н. КАРТАШЕВИЧ,
П.Ю. МАЛЫШКИН, Г.Н. ГУРКОВ, А.А. СОБОЛЕВСКИЙ
(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)*

Рассматривается вопрос улучшения экологических показателей работы дизеля при использовании альтернативного вида топлива на основе этанола. Приводятся результаты испытаний по смешиванию двух видов топлив – дизельного и этилового спирта – с добавлением сукцинимидной присадки, а также экологические параметры дизеля Д-243. Применение присадки позволяет значительно увеличить время расслоения двух топлив за счет высоких диспергирующих свойств, что в свою очередь позволяет применить альтернативные виды топлива (этанол) без значительных изменений в топливной системе.

Введение. Спектр возобновляемых альтернативных видов топлива, применяемых для автотракторной техники, в настоящее время довольно широк. Среди них можно выделить основные: алифатические спирты, биогаз, диметилловый эфир, водородное топливо, топлива на основе растительных масел.

К спиртовым топливам в первую очередь можно отнести метанол и этанол. Они получили наибольшее распространение в качестве моторного топлива и хорошо зарекомендовали себя при использовании в качестве добавок к дизельному топливу. Простая замена дизельного топлива на спирт в штатной топливной системе дизеля невозможна вследствие нарушения рабочего процесса. Необходима компенсация изменения свойств этих топлив в сравнении с рассматриваемым нами топливом [1].

В настоящее время исследователями выделены разнообразные способы применения спиртов в качестве топлив для дизелей: работа дизеля на чистом спирте путем применения присадки, повышающей цетановое число; создание растворов и эмульсий спиртов в дизельном топливе; карбюрирование или впрыскивание спирта во впускной трубопровод, а дизельного топлива в цилиндр; применение двойной системы топливоподачи; конвертация дизеля в двигатель с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием, также возможны различные сочетания и модификации этих способов [1].

Применение альтернативных моторных видов топлива изменяет организацию рабочего процесса двигателя, так как изменяются свойства топлива: цетановое число, плотность, испаряемость, вязкость, низшая расчетная теплота сгорания и др. Поскольку адаптировать новые топлива к существующим моделям дизелей достаточно сложно, необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования по влиянию этанолсодержащих топлив на организацию рабочего процесса дизельного двигателя.

Исследования по смешиванию дизельного топлива и этилового спирта C_2H_5OH (этанола) проведены на кафедре «Тракторы и автомобили» УО БГСХА. На первом этапе измерялось время расслоения смеси дизельного топлива и этанола при ручном способе смешивания. На втором – измерялось время расслоения смеси дизельного топлива, этанола и сукцинимидной присадки С-5А ТУ 0257-015-33992933-2006 марки «В» ручным и ультразвуковым способом в ультразвуковой ванне Launch ODA DH50 объемом 1 л. Время расслоения замерялось с помощью секундомера СОСпр-26-2-00.

Стендовые испытания дизеля Д-243 проводились в аккредитованной лаборатории испытания двигателей на кафедре «Тракторы и автомобили» согласно методике стендовых испытаний [9 – 11].

Основная часть. В своих исследованиях ученые обосновывают различные оптимальные концентрации смесевых топлив на основе этанола: ДТ 90 % + 10 % C_2H_5OH ; ДТ 85 % + 15 % C_2H_5OH ; ДТ 80 % + 20 % C_2H_5OH ; ДТ 70 % + 30 % C_2H_5OH [2 – 5]. Физико-химические свойства этанола и дизельного топлива (ДТ) имеют существенные отличия и представлены в таблице 1.

В результате проведенных предварительных исследований установлено, что среднее время расслоения смеси дизельного топлива и этанола не превышает 9 минут (рис. 1), что усложняет использование этанола в смеси с дизельным топливом и хранение в топливном баке транспортного средства.

Дальнейший поиск эффективных способов смешивания не улучшил время расслоения смеси дизельного топлива и этанола. Однако время расслоения этой смеси можно значительно увеличить, применяя присадки, улучшающие диспергирующие свойства.

На втором этапе исследований проводилось смешивание смеси с сукцинимидной присадкой С-5А, предназначенной для улучшения диспергирующих и моющих свойств смазочных масел. Рекомендуемая концентрация присадки 1,5...3,5 % масс. Присадка представляет собой 40 %-ный концентрат алкенилсукцинимидов в минеральном масле и непрореагировавшем полибутене; производится в ЗАО «Научно-производственное предприятие «Алтай-спецпродукт». (Предприятие специализируется на производстве сложных химических соединений специального назначения, в том числе поверхностно-

активных веществ и эмульгаторов). Характеристика и физико-химические свойства сукцинимидной присадки С-5А ТУ 0257-015- 33992933-2006 марки «В» представлены в таблице 2 [6].

Таблица 1

Физико-химические свойства ДТ и этанола

Физико-химические свойства	ДТ	Этанол
Химическая формула	(C _n H _m)	C ₂ H ₅ OH
Элементарный состав С:Н:О, кг/кг	86:14:0	22:67:11
Стехиометрическое соотношение, кг/кг	14,6	9
Плотность при 20 °С, кг/м ³	860	790
Кинематическая вязкость при 20 °С, сСт	3-6	1,074
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,5	30,54
Коксуемость 10 % остатка, % по массе	0,2	0
Содержание серы, % по массе	0,2	0,1
Цетановое число, ед.	45	8
Температура самовоспламенения, °С при 1 атм.	250	404
Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м	27,1	22,8

Источник: [3; 7; 8].

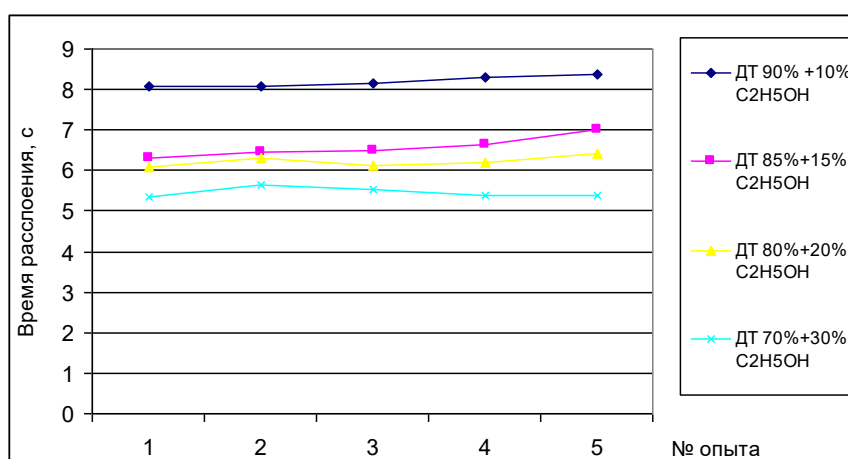


Рис. 1. Измерение времени расслоения смеси ДТ с этанолом в разных соотношениях

Таблица 2

Физико-химические свойства присадки сукцинимидной С-5А

Наименование показателей	Норма по ТУ	Данные анализа
Внешний вид	Вязкая прозрачная жидкость от вишневого до светло-вишневого цвета	Соответствует
Цвет, ед. ЦНТ при разбавлении 15:85, не более	6,0	2,0
Вязкость кинематическая при 100 °С, сСт, не более	300	68
Щелочное число, мг КОН на 1 г присадки, не менее	20,0	49,2
Кислотное число, мг КОН на 1 г присадки, не более	4,0	1,1
Массовая доля азота в присадке, % не менее	1,1	1,64
Массовая доля механических примесей, % не более	0,06	0,06
Массовая доля воды, % не более	0,1	0,10
Массовая доля активного вещества, % не менее	40,0	42,3
Массовая доля свободных полиаминов, % не более	0,8	0,8
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	160	196
Степень чистоты, мг/100 г, не более	400	110

Результаты исследований, проведенных при смешивании ДТ и этанола, представлены в таблице 3.

На основании данных таблицы 3 можно сделать вывод, что присадка увеличила время расслоения в разы по сравнению с аналогичными процентными содержаниями топлив без присадки.

Таблица 3

Время расслоения смеси ДТ, этанола и сукцинимидной присадки

Количество присадки, %	Вид смеси					Способ смешивания
	ДТ 95 % + + 5 % C ₂ H ₅ OH	ДТ 90 % + + 10% C ₂ H ₅ OH	ДТ 85 % + + 15 % C ₂ H ₅ OH	ДТ 80 % + + 20 % C ₂ H ₅ OH	ДТ 70 % + + 30 % C ₂ H ₅ OH	
Время расслоения смеси, мин						
0	9,6	8,19	6,72	6,17	5,43	Ручной
1,25	41,43	34,53	28,8	25,7	23,9	Ручной
2,5	42,22	36	29,47	27,3	25,7	Ручной
3,75	42,5	37,4	32	29,1	27,5	Ручной
5	44,06	38,6	33,8	30,9	29,3	Ручной
6,25	45,28	40,4	36,5	34,15	32,5	Ручной
7,5	46,35	42,3	39,6	37,9	36,6	Ручной
10	49,45	45,8	44,3	43,1	42,4	Ручной
12,5	52,31	49,4	47,6	47,3	46,8	Ручной
1,25	56,37	44,8	38,2	32,4	27,5	Ультразвук
2,5	56,45	45,4	38,8	32,7	29	Ультразвук
3,75	57,08	46	39,3	33,7	30,6	Ультразвук
5	57,3	46,9	40	34,9	32	Ультразвук
6,25	58,0	47,7	41,4	36,2	33,7	Ультразвук

Наглядное изменение времени расслоения смеси с различной концентрацией присадки с разными способами смешивания представлено на рисунке 2...5.

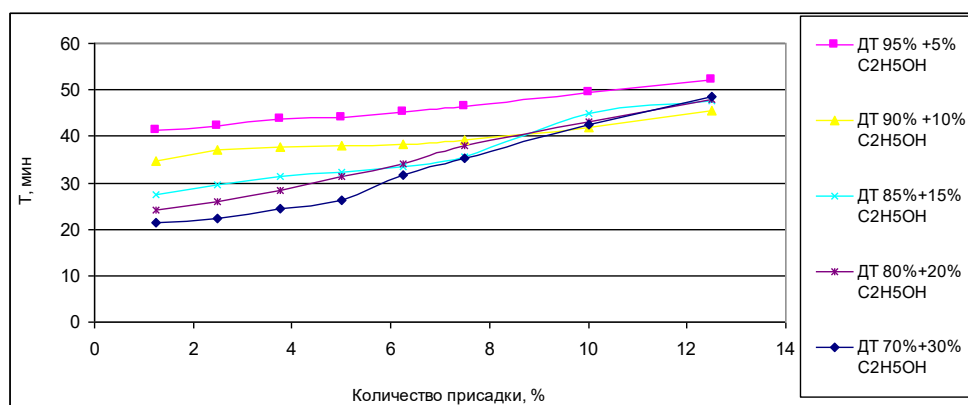


Рис. 2. Зависимость времени расслоения смеси от количества присадки при ручном способе смешивания

Из рисунка 2 следует, что с увеличением количества сукцинимидной присадки в смеси с 1,25 до 6,25 % и с 1,25 до 12,5 % время расслоения увеличивается на 26,5 и 48,9 % соответственно.

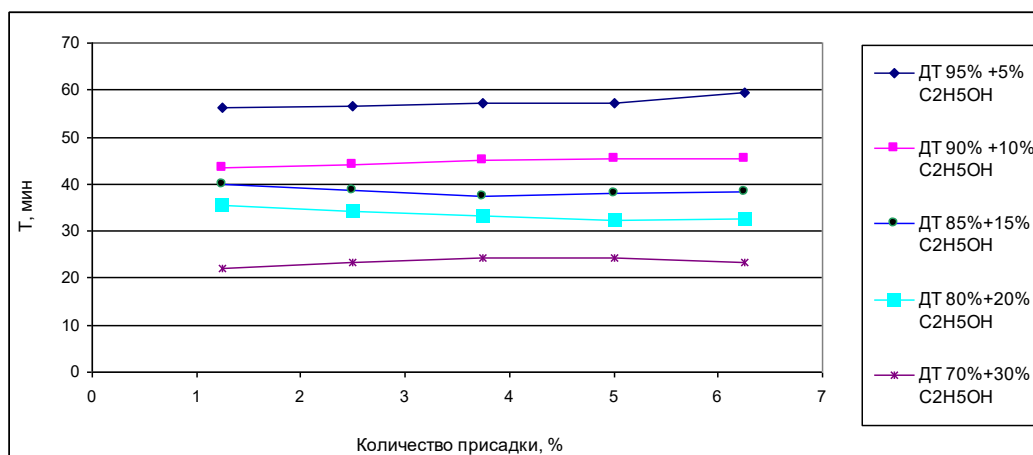


Рис. 3. Зависимость времени расслоения смеси от количества присадки при ультразвуковом способе смешивания

Из рисунка 3 видно, что с увеличением количества сукцинимидной присадки в смеси с 1,25 до 6,25 % время расслоения смеси увеличивается на 22,5 %.

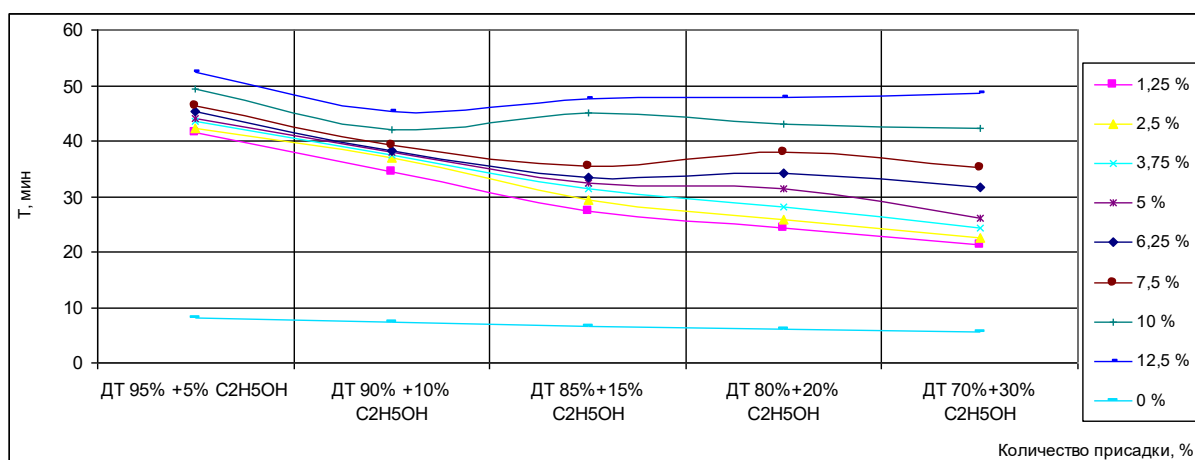


Рис. 4. Зависимость времени расслоения смеси от соотношения ДТ и этанола

С увеличением количества этанола уменьшается время расслоения смеси, о чем свидетельствует рисунок 4, при этом с увеличением количества вводимой присадки время расслоения увеличивается.

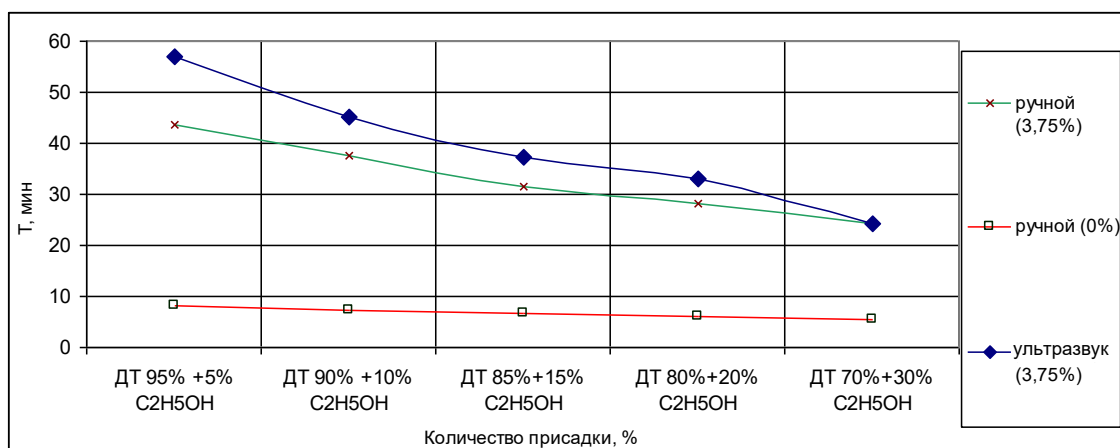


Рис. 5. Зависимость времени расслоения смеси от концентрации присадки с разными способами смешивания

Рисунок 5 наглядно показывает, что ультразвуковой способ эффективнее ручного, но с увеличением количества присадки эта разница снижается с 28,1 до 3,7 %.

При рекомендуемой концентрации присадки 1,5...3,5 % [6] выбрана концентрация, равная 2,5 %, при этом ультразвуковой способ смешивания эффективнее ручного на 12,8 % при концентрации ДТ 70 % + 30 % C₂H₅ОН и на 33,7 % при концентрации ДТ 95 % + 5 % C₂H₅ОН.

Из проведенных на кафедре «Тракторы и автомобили» исследований на дизеле Д-243 по подаче ДТ и этанола установлено влияние этанола на экологические показатели тракторного двигателя.

Так, при стендовых испытаниях замерялись следующие параметры:

- твердые частицы сажи (С), %;
- окислы азота NO_x, ppm;
- несгоревшие углеводороды СН, ppm.

Наибольший интерес вызывают экологические параметры, представленные на рисунке 7...8.

Из рисунка 7 видно, что с повышением количества этанола в смеси снижается на 18 % образование твердых частиц сажи в цилиндрах дизеля на номинальном режиме.

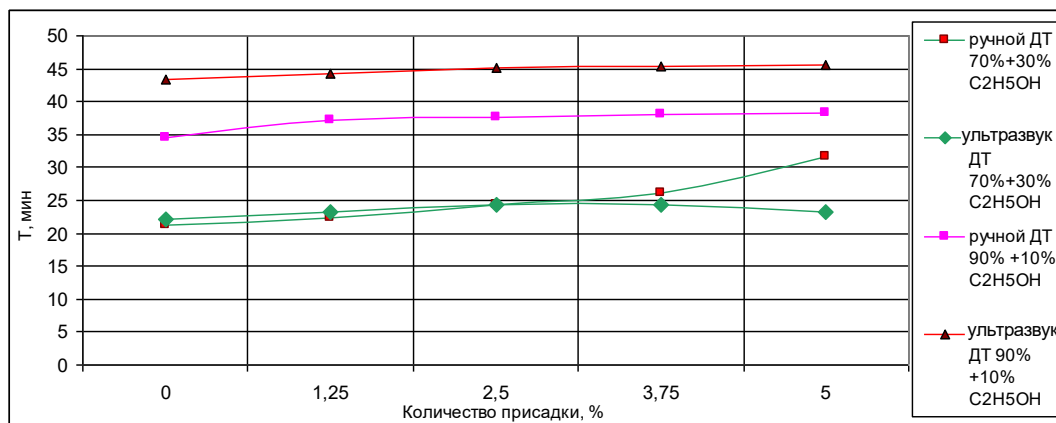


Рис. 6. Зависимость времени расслоения смеси от соотношения ДТ и этанола с рекомендуемой концентрацией присадки

Данные, представленные на рисунке 8, свидетельствуют, что с повышением количества этанола в смеси увеличивается содержание окислов азота, выбрасываемых в атмосферу, на 16 % на номинальном режиме.

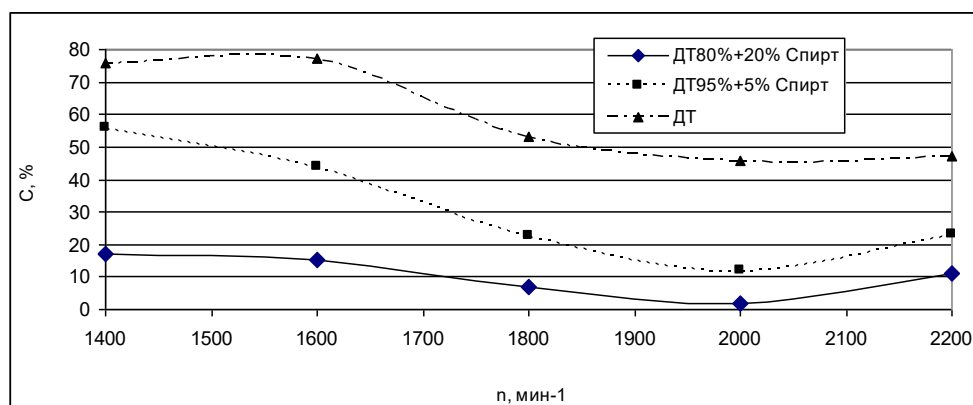


Рис. 7. Зависимость содержания твердых частиц сажи от частоты вращения двигателя на внешней скоростной характеристике

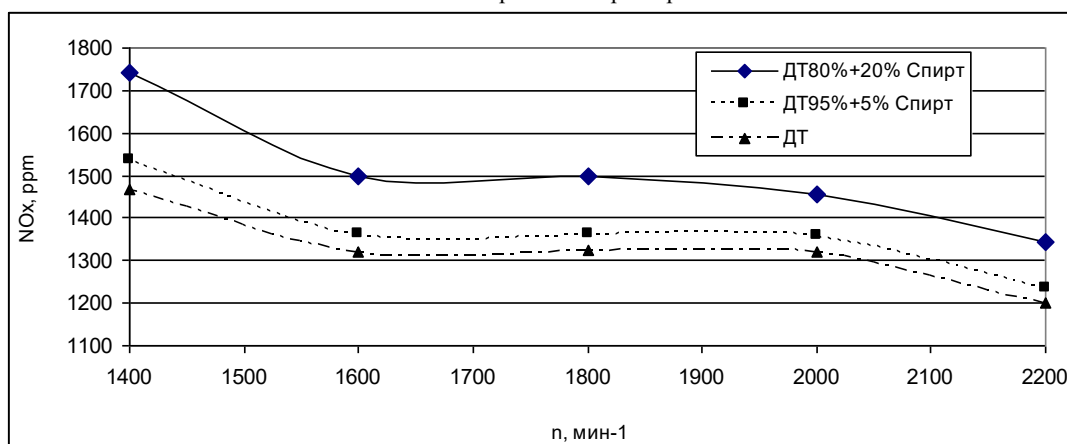


Рис. 8. Зависимость содержания окислов азота от частоты вращения двигателя на внешней скоростной характеристике

Заключение. Представленные данные проведенных исследований показывают, что применение одного этанола значительно улучшает экологические показатели дизеля: NO_x на 16 %, сажи на 18 %. Од-

нако раздельное применение требует двойной системы подачи, что значительно усложняет конструкцию системы питания.

Применение смеси дизельного топлива и этанола и подача штатной системой питания является наиболее перспективной и рациональной, но при этом, как показывают проведенные исследования, необходимо применять присадки-эмульгаторы, увеличивающие время расслоения смеси в топливном баке транспортного средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташевич, А.Н. Расчет показателей процесса сгорания этанолсодержащих топлив в дизеле / А.Н. Карташевич, Г.Н. Гурков, С.А. Плотников // Вестн. Белорус. гос. сельскохозяйственной акад. – 2011. – № 3. – С. 156 – 159.
2. Карташевич, А.Н. Применение этанолсодержащих топлив в дизеле / А.Н. Карташевич, Г.Н. Гурков, С.А. Плотников. – Киров: Авангард, 2011. – Ч. I. – 116 с.
3. Альтернативные виды топлива для двигателей / А.Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.
4. Карташевич, А.Н. Возобновляемые источники энергии: науч.-практ. пособие / А.Н. Карташевич, В.С. Товстыка. – Горки: БГСХА, 2007. – 264 с.
5. Гуцин, С.Н. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей применением спирто-содержащих топлив / С.Н. Гуцин, С.А. Плотников. – Киров, 2003. – 162 с.
6. Паспорт на сукцинимидную присадку С-5А ТУ 0257-015-33992933-2006 марка «В».
7. Спирты [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Спирты>. – Дата доступа: 24.03.2013.
8. Спирты. Свойства спиртов. Получение спиртов [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://kristallikov.net/page44>. – Дата доступа: 24.03.2013.
9. Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на тракторах: ГОСТ Р 41.96-2005. Правила ЕЭК ООН 96.
10. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний: ГОСТ 18509-88.
11. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия: ГОСТ 20000-88.

Поступила 07.06.2013

IMPROVEMENT OF ECOLOGIC PERFORMANCE OF THE WORK OF DIESEL WHEN USING AN ALTERNATIVE KIND OF FUEL ON THE BASIS OF ETHANOL

A. KARTASHEVICH, P. MALYSHKIN, G. GURKOV, A. SOBOLEVSKY

The issue of improvement of ecologic performance of the work of diesel when using an alternative kind of fuel on the basis of ethanol is considered. The article presents the results of the tests on the mixing of the two kinds of fuel: diesel and ethanol with the addition of succinimide additives, and also the environmental parameters of diesel D-243. The use of additives can significantly increase the time bundle of two fuels due to high dispersing properties, which in turn allows to use the alternative types of fuels (ethanol), without significant changes in the fuel system.

УДК 665.775.4:665.7.032.53

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ТОРФА
В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ПРИСАДОК К ДОРОЖНЫМ БИТУМАМ****канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК, И.А. БОРОДИЙ, Е.В. МИХАЙЛОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Проанализированы требования, предъявляемые к присадкам к дорожным битумам. Приведены компонентный состав гуминовых веществ и методика выделения их из торфа. Установлено, что выделенные из торфа и модифицированные аминами гуминовые вещества торфа непригодны для применения в качестве присадок к дорожным битумам. Доказана возможность использования гуминовых веществ торфа в качестве сырьевого компонента при синтезе присадок к дорожным битумам совместно с рапсовым маслом и диэтилентриамином. Предложен вероятный химический состав получаемого продукта. Установлено, что синтезированный продукт повышает степень сцепления битума с поверхностью как кислых, так и щелочных минеральных материалов. Показано, что продукт взаимодействия гуминовых веществ торфа с рапсовым маслом и диэтилентриамином оказывает на нефтяной дорожный битум выраженное структурирующее и стабилизирующее действие, замедляет его термоокислительное старение.

Введение. Практика эксплуатации автомобильных дорог показывает, что долговечность асфальтобетонных дорожных покрытий в значительной степени определяется качеством вяжущего материала – нефтяного дорожного битума, который должен обладать комплексом необходимых структурно-механических свойств, устойчивостью против старения, способностью обеспечивать прочное сцепление с поверхностью минеральных материалов. В силу своих природных качеств нефтяные битумы не в состоянии создавать условия для долговременной работы дорожных покрытий под действием современных транспортных нагрузок и неблагоприятных погодных условий. В последние годы специалисты в области дорожного строительства и нефтепереработки пришли к пониманию того, что для улучшения вышеперечисленных характеристик дорожных битумов в их состав необходимо вводить полимеры, главным образом термоэластопласты, и присадки широкого спектра действия – пластифицирующие, адгезионные, стабилизирующие и пр. [1; 2]. Главной целью модифицирования является: расширение интервала пластичности битумов, повышение их устойчивости к старению, усиление степени сцепления с поверхностью как основных, так и кислых минеральных материалов, промышленная и экологическая безопасность получения и применения модифицированных битумов и пр. В результате подбора оптимального соотношения компонентов в системе «битум – полимер – присадка» при необходимости можно добиться улучшения как одного, так одновременно и нескольких свойств битумного материала.

К присадкам, применяемым для регулирования свойств битумов, предъявляется ряд требований. Они должны обладать высокой термической устойчивостью, т.е. не разлагаться и не терять активность при температуре приготовления асфальтобетонной смеси и при хранении. Быть технологичными, т.е. удобными в применении, и хорошо совмещаться с битумом, равномерно распределяясь во всем его объеме. Повышать степень сцепления битума с поверхностью минеральных материалов и эффективно противостоять воздействию неблагоприятных внешних факторов: температуры, ультрафиолетового излучения, кислорода воздуха, воды. Замедлять протекание термоокислительных процессов в битуме, приводящих к снижению его пластичности и повышению хрупкости. Не придавать битуму жесткость, ломкость и хрупкость при низких температурах. Не растворяться в воде и обладать высокой устойчивостью к биологическому разложению. Таким образом, современные присадки к битумам должны быть химически, физически и биологически стабильными при хранении, переработке и в реальных условиях работы в составе дорожного покрытия. При этом они должны быть доступны и относительно недороги.

Практика и многочисленные исследования показали, что наиболее эффективным способом обеспечения хорошего сцепления битумов с поверхностью минеральных материалов является введение в их состав адгезионных добавок, содержащих катионные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Это обусловлено тем, что нефтяные битумы обладают плохой адгезией к широко применяемым в дорожном строительстве минералам кислотного типа: песчано-гравийным смесям, гранитному щебню, кварциту.

Как правило, в качестве катионоактивных ПАВ применяют алкилдиамины, получающиеся восстановлением водородом продуктов реакции алкиламинов с акрилонитрилом, или соединения типа ациламиноаминов и алкилимидазолинов, получающиеся при сочетании различных карбоновых кислот с полиэтиленполиаминами. При введении в битум молекулы адгезионных добавок мигрируют к поверхности раздела «битум/каменный материал». При этом положительно заряженные (гидрофильные) головные группы катионного ПАВ ($-NH_3^+$) прочно прикрепляются к отрицательно заряженным участкам на поверхности каменного материала, а гидрофобные углеводородные «хвостовые части» молекул «закрепля-

ются» в битуме. Такие адгезионные добавки, носящие название «связующие активаторы», действуют как «мост» или «клей» между битумом и поверхностью каменного материала, оказывая сопротивление вытесняющему действию воды [3].

Однако поверхность большинства применяемых в дорожном строительстве минеральных материалов мозаична. В частности, в работе [4] показано, что на поверхности гранита имеются активные центры различной природы – кислоты Льюиса, основания и кислоты Бренстеда. Соотношение вышеуказанных центров примерно равно 1:6:11 соответственно. В связи с этим в последнее время ведутся активные исследования по получению адгезионных присадок к битумам двойного действия, содержащих в своем составе комплекс катионных, анионных и амфолитных ПАВ [5 – 10]. При введении таких присадок в битум наряду с улучшением степени сцепления с поверхностью минералов отмечается повышение его термоокислительной стабильности и снижение вязкости, т.е. присадки оказывают на битум стабилизирующее и пластифицирующее действие [11; 12]. В настоящее время на рынке имеется достаточно широкий ассортимент адгезионных присадок к битумам. Однако одни из них достаточно дороги, что сдерживает их практическое применение в дорожном строительстве, а другие недостаточно химически стабильны в условиях получения асфальтобетонных смесей, что на практике приводит к снижению их эффективности и необходимости увеличения расхода. В связи с этим разработка технологии получения новых дешевых и высокоэффективных присадок к дорожным битумам на основе местных источников сырья является актуальной задачей.

Одним из основных способов получения адгезионных присадок к дорожным битумам является смешивание кислотного или жирового компонента с органическими полиаминами при температуре 150...180 °С в течение 3...5 часов с последующим охлаждением до 100...120 °С и при необходимости, для улучшения технологических свойств конечного продукта (повышения температуры вспышки, снижения температуры каплепадения) и регулирования активности, разбавление продукта синтеза высокоароматичным нефтяным остатком и/или исходным жировым компонентом [8]. В качестве кислотного компонента могут быть использованы вещества растительного или животного происхождения, нефтепродукты и различные отходы производства, содержащие в своем составе свободные карбоновые кислоты или жиры.

Ранее проведенные исследования [12] показали, что в результате взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином (ДЭТА) получают мазеподобные продукты с температурой каплепадения менее 49 °С, практически не растворимые в воде, но хорошо растворимые в толуоле и разогретом нефтяном битуме, содержащие в своем составе мицеллообразующие ПАВ с высокими аминными числами. По химическому составу эти продукты представляют собой сложную смесь амидоаминов жирных кислот, их моно- и диглицеридов, глицерофосфолипидов и их производных, а также глицерина, солей жирных кислот, токоферолов, фитостеролов и пигментов, т.е. целый комплекс ПАВ различного функционального действия. При введении в нефтяной битум вышеуказанные продукты оказывают на него пластифицирующее действие, снижая динамическую вязкость и повышая пенетрацию, или глубину проникания, иглы, улучшают степень его сцепления с поверхностью как кислых (гранитный щебень), так и щелочных (мрамор) минеральных материалов, замедляют старение битумов при термообработке в условиях ГОСТ 18180-72 в течение 5 часов.

Помимо рапсового масла, потенциальными источниками местного сырья для получения присадок к битумам является торф. К настоящему времени уже проводились исследования по использованию измельченного торфа в качестве стабилизирующей добавки к щебеночно-мастичным асфальтобетонным смесям и как активирующей присадки для повышения прочности адгезионной связи в системе «битум - минеральный наполнитель». Выявлено положительное влияние на свойства асфальтобетона активации его минеральной части продуктами термической деструкции торфа [13]. В работе [14] предлагается подвергнуть содержащиеся в торфе гуминовые кислоты и частично окисленный торфяной битум различным химическим модификациям, например, аминированию или малеинированию, превратив их в катионоактивные или амфотерные ПАВ.

Проводились исследования и по изучению влияния добавок специально подготовленных торфов на свойства нефтяных битумов [15], которые показали возможность получения на основе торфо-битумного вяжущего мастик различного назначения. Отличительными особенностями вышеуказанных материалов были низкая теплопроводность и пластичность (растяжимость), что затрудняло их повторный разогрев и не позволяло использовать цельный торф в качестве модифицирующей добавки к дорожным битумам.

В связи с вышесказанным особый интерес представляют гуминовые вещества торфа, представляющие собой сложную смесь природных органических соединений, образующихся при биохимическом разложении отмерших растений и их гумификации. Различают несколько групп гуминовых веществ:

- 1) гуминовые кислоты, растворимые только в щелочных растворах;
- 2) гиматомелановые кислоты, извлекаемые из гуминовых кислот этиловым спиртом;
- 3) фульвокислоты – часть гуминовых веществ, растворимая в воде, щелочных и кислых растворах;
- 4) гумин – практически нерастворимое и неизвлекаемое из торфа и компостов органическое вещество.

Гуминовые вещества содержат большой набор различных функциональных групп: карбоксильных, карбонильных, аминных и пр. При обработке торфа щелочью некоторые компоненты гуминовых веществ подвергаются гидролизу и в раствор переходят их низкомолекулярные фрагменты, сахараиды, а также от 17 до 22 видов альфа-аминокислот. При этом массовая доля аминокислот в гуминовых веществах торфа может достигать 10 % масс. [16].

В работе [17] предложен способ фракционирования гуминовых веществ торфа без предварительного выделения из него битумов, т.к. это экономически нецелесообразно, путем их экстрагирования из торфа водным раствором щелочи с последующим осаждением фракций гуминовых веществ раствором соляной кислоты. Установлено, что элементный состав гуминовых веществ пушицево-сфагнового верхового торфа со степенью разложения 45 % при изменении pH раствора от 12,7 до 2,0 изменяется в % масс.: углерод – от 65,4 до 57,9; водород – от 8,0 до 5,7; азот – от 2,6 до 1,2; сера – от 0,9 до 1,0; кислород – от 23,1 до 34,2. При снижении значения pH среды содержание кислорода в составе гуминовых веществ увеличивается и растет содержание карбоксильных групп. При этом отмечается скачкообразный рост отношения кислород/углерод при значениях pH от 7,9 до 6,0. Доля фракций гуминовых веществ, выделенных при pH раствора ниже 7,9, составляет более 75 % масс. Следовательно, при получении присадок к битумам желательно использовать фракции гуминовых веществ, растворимые в нейтральной или слабокислой среде.

Учитывая вышесказанное, можно ожидать, что введение в состав адгезионных присадок к битумам гуминовых веществ торфа потенциально способно повысить их эффективность, а возможно, и придать им уникальные свойства.

Исследовательская часть. Целью настоящей работы является изучение возможности использования гуминовых веществ торфа в качестве компонента присадок к дорожным битумам.

В качестве объекта исследований были выбраны гуминовые вещества, выделенные из пушицево-сфагнового верхового торфа со степенью разложения 30 % и обменной кислотностью pH равной 2,24, путем промывания его 0,1н водным раствором КОН с последующей нейтрализацией 0,1н раствором HCl до значения pH равного 7. Нейтрализация проводилась с целью осаждения наиболее высокомолекулярных и наименее кислых, следовательно, потенциально коллоидно неустойчивых гуминовых кислот. В результате был получен раствор черного цвета с содержанием сухого остатка 4,2 % масс. Изучение микроструктуры полученного раствора показало, что гуминовые вещества склонны к ассоциации. При испарении воды из раствора при комнатной температуре в тонком слое (около 3 мм) наблюдается формирование объемного осадка, состоящего из хрупких лентообразных структур с однородной черной глянцевой поверхностью.

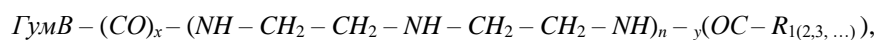
При выпаривании из раствора гуминовых веществ воды и последующем высушивании при температуре $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ наблюдается образование однородного плотного осадка, который при измельчении превращается в полидисперсный порошок с частицами сложной ассиметричной формы. Установлено, что выделенные из торфа вышеописанным способом гуминовые вещества нерастворимы в толуоле и несовместимы с нефтяными битумами, образуя седиментационно неустойчивые смеси. Кроме того, гуминовые вещества водорастворимы и подвержены интенсивному биологическому разложению под действием плесневых грибов и почвенных бактерий.

Введение в раствор гуминовых веществ ДЭТА с последующим выпариванием воды, добавлением остаточного экстракта селективной очистки нефтяных масел и выдерживанием при температуре $(140 \dots 160)^\circ\text{C}$ в течение часа привело к образованию плотного осадка, нерастворимого ни в воде, ни в органических растворителях. Вероятно, это связано с протеканием реакций поликонденсации гуминовых веществ (ГумВ) торфа с ДЭТА и образованием следующих соединений:



Таким образом, выделенные из торфа раствором щелочи и обработанные полиаминами гуминовые вещества непригодны для использования в качестве присадки к нефтяным битумам. Достигнуть поставленной цели, вероятно, можно только в том случае, если придать гуминовым веществам способность образовывать с нефтяными битумами коллоидно устойчивые и достаточно однородные смеси. При этом они должны частично растворяться в нефтепродуктах, т.е. необходима их лиофилизация.

В качестве добавок, потенциально способных оказать на гуминовые вещества торфа подобное влияние, могут выступать компоненты растительных масел, например, жирные кислоты и глицериды рапсового масла, потенциально способные при взаимодействии с гуминовыми веществами образовывать следующие соединения:



где $R_{1,2,3, \dots}$ – углеводородные радикалы жирных кислот рапсового масла (олеиновой $\text{C}_{18:1}$, линолевой $\text{C}_{18:2}$, эруковой $\text{C}_{22:1}$ и пр.).

С целью получения продуктов, содержащих вышеуказанные соединения, нами предложено проводить совместный синтез гуминовых веществ и рапсового масла с полиаминами по следующей методике. В обогреваемую емкость с механической мешалкой вводятся расчетные количества нейтрального водного раствора гуминовых веществ, жировой основы – рапсового масла и от 0,2 до 0,6 % масс. кристаллического гидроксида калия, являющегося катализатором процесса взаимодействия сырьевых компонентов. Включается обогрев и мешалка. При достижении в реакторе температуры $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ в него подается расчетное количество полиамина. Затем температура в реакторе повышается до $(160 \pm 10)^\circ\text{C}$ и проводится синтез в течение часа. При необходимости, с целью улучшения технологических свойств конечного продукта, по окончании синтеза реакционная смесь разбавляется высокоароматичным нефтяным остатком.

Установлено, что в результате синтеза гуминовых веществ торфа и рапсового масла с ДЭТА по вышеуказанной методике получают нерастворимые в воде и хорошо растворимые в нефтяных битумах продукты сложного химического состава, вероятно, содержащие целый комплекс поверхностно-активных веществ различного функционального действия.

С целью выявления возможности использования гуминовых веществ торфа в качестве компонента присадок к дорожным битумам были синтезированы продукты, компонентный состав которых указан в таблице 1, и проведено сравнение их свойств с продуктом, не содержащим гуминовых веществ торфа.

Таблица 1

Компонентный состав сырьевой смеси и свойства исследуемых продуктов

Наименование	Исследуемый продукт		
	№ 1	№ 2	№ 3
<i>Компонентный состав сырьевой смеси, % масс.</i>			
- рапсовое масло	80	72	64
- гуминовые вещества торфа (в пересчете на сухой остаток)	–	8	16
- ДЭТА	20	20	20
<i>Свойства продукта:</i>			
- растворимость в гексане при 30°C , % масс.	99,8	57	–
- растворимость в толуоле при 30°C , % масс.	99,8	70	–
- плотность при 20°C , кг/м^3	921,1	970,6	1039,7
- температура каплепадения, $^\circ\text{C}$	48	149	155
- аминное число, мг HCl/г	93,5	115,5	125,0
- аминное число после термообработки при $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 5 часов, мг HCl/г	92,7	110,3	–
- температура вспышки, $^\circ\text{C}$	> 240	> 240	> 240

Установлено, что продукт № 1 практически полностью растворим в гексане, толуоле и этиловом спирте при температуре 30°C . Растворимость продукта № 2 увеличивается с ростом полярности растворителя. Нерастворимая в гексане часть продукта № 2 (43 % масс.), вероятно, состоит из продуктов взаимодействия гуминовых веществ торфа с ДЭТА и жирными кислотами рапсового масла, а растворимая часть (57 % масс.) – из продуктов взаимодействия рапсового масла с ДЭТА. Нерастворимой в гексане, но растворимой в толуоле частью исследуемого продукта (13 % масс.), вероятно, являются наиболее олеофилизированные компоненты гуминовых веществ, например, производные фульвокислот.

Выдвинутое предположение подтверждается результатами изучения микроструктуры синтезированных продуктов до и после разбавления экстрактом селективной очистки масел. Установлено, что продукт № 1 гомогенен. Продукты с добавлением гуминовых веществ торфа гетерогенны и содержат полидисперсные ассиметричные (преимущественно пластинчатые) частицы, склонные к коагуляции и образованию больших скоплений. Практически все отдельно расположенные мелкие частицы с размером менее 10 мкм и края более крупных частиц полупрозрачны в проходящем свете и имеют цвет от желто-оранжевого до розового. После разбавления экстрактом эти полупрозрачные фрагменты исчезают, и остаются только скопления непрозрачных черных частиц, которые, вероятно, состоят из смеси гуминовых и гиматомелановых кислот, последние из которых растворяются в спирте. Нерастворимый в спирте остаток продукта № 2 (12 % масс.), по-видимому, включает в себя продукты взаимодействия высокомолекулярных гуминовых веществ между собой и/или молекул гуминовых веществ с молекулами ДЭТА. Все исследуемые продукты нерастворимы в воде.

С увеличением процентного содержания гуминовых веществ в реакционной смеси наблюдается рост среднего размера частиц дисперсной фазы и количества плотных непрозрачных частиц, а также плотности получаемого продукта. Так, введение в реакционную смесь 8 % масс. гуминовых веществ торфа приводит к повышению плотности продукта на 5,37 %, а увеличение их содержания до 16 % масс. повышает плотность продукта № 3 по сравнению с продуктом № 1 на 12,88 %.

Одним из наиболее важных показателей качества адгезионных присадок к битумам является температура каплепадения, характеризующая степень межмолекулярного взаимодействия между входящими в их состав компонентами, а также определяющая их технологичность, в частности температуру разогрева перед введением в битум.

Установлено, что введение в реакционную смесь гуминовых веществ торфа приводит к резкому повышению температуры каплепадения получаемых продуктов. Так, температуры каплепадения продуктов № 2 и № 3, содержащих соответственно 8 и 16 % масс. гуминовых веществ торфа, на 101 и 107 °С выше температуры каплепадения продукта № 1. Наличие в составе исследуемых продуктов производных гуминовых веществ торфа приводит к образованию гелеобразных структур, заметное разрушение которых наблюдается только при добавлении более 60% масс. экстракта. В работе использовался экстракт с температурой каплепадения 20 °С и показателем преломления n_D , при 20 °С равным 1,55. Увеличение содержания гуминовых веществ в сырьевой смеси приводит к повышению температуры каплепадения получаемого продукта, что свидетельствует о возрастании количества коагуляционных контактов в системе (рис. 1).

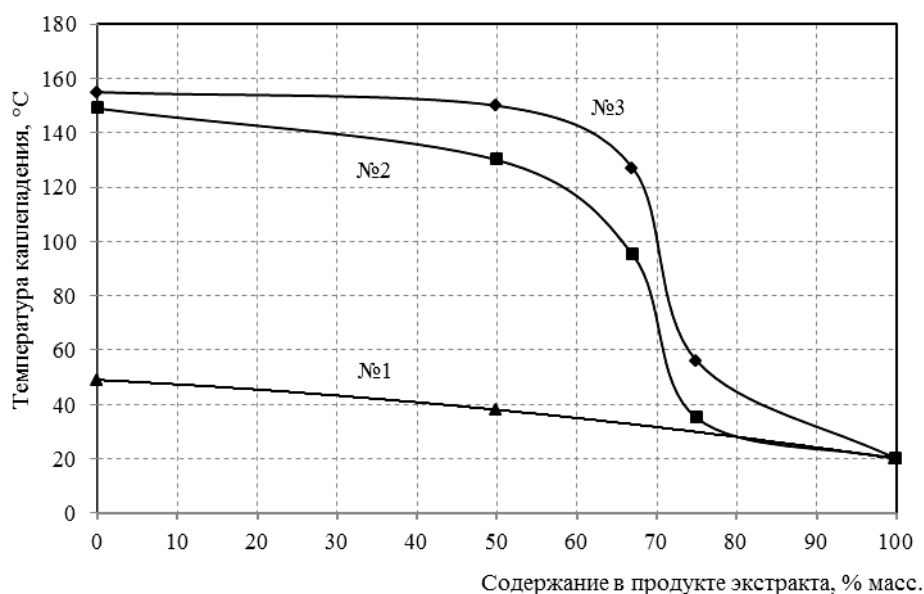


Рис. 1. Изменение температуры каплепадения исследуемых продуктов в результате разбавления остаточным экстрактом селективной очистки масел

Важным показателем, характеризующим активность адгезионной присадки катионного типа, является аминное число. Установлено, что аминные числа продуктов № 2 и № 3 выше, чем у продукта № 1. В результате термообработки при (160 ± 5) °С в течение 5 часов в слое 5 мм уменьшение аминных чисел образцов у продукта № 1 составило 0,86 %, а у продукта № 2 – 4,5 %, что свидетельствует об их достаточно высокой термической стабильности по данному показателю. Исследуемые продукты высокоустойчивы и к биологическому разложению под действием плесневых грибов и почвенных бактерий. Отмечается прямо пропорциональная зависимость между изменением устойчивости продуктов к биологическому разложению и их аминными числами. При этом благодаря нерастворимости в воде, исследуемые продукты не оказывают заметного влияния на интенсивность развития микроорганизмов, находящихся рядом с ними в водной фазе, т.е. потенциально экологически безопасны.

Результаты изучения влияния содержания продуктов № 1 и № 3 на изменение температуры размягчения и глубину проникания иглы нефтяного окисленного битума приведены на рисунке 2.

Установлено, что введение в исходный битум продукта № 1 приводит к снижению его температуры размягчения и незначительному повышению глубины проникания иглы при 25 °С, т.е. продукт оказывает на битум пластифицирующее действие. Введение в битум продукта № 3, напротив, приводит к повышению температуры размягчения и снижению глубины проникания иглы, т.е. способствует повышению теплостойкости битума, оказывая на него структурирующее действие. При этом исследуемые продукты не оказывают заметного влияния на растяжимость битума при 25 °С, значение которой находится в пределах 92...94 см.

Одним из важнейших факторов, определяющих долговечность битумных и битумно-минеральных материалов, является старение входящего в их состав битума. Под старением битумов подразумевают сово-

купность всех химических и физических процессов, приводящих со временем к изменению их свойств [1]. Устойчивость битумов к старению, в большей мере тепловому и химическому, характеризуется термоокислительной стабильностью. Для её повышения и, следовательно, для замедления старения необходимо воздействовать на происходящие процессы, уменьшая их скорость или определённым образом увеличивая сопротивляемость битума к внешним воздействиям за счёт создания более устойчивой структуры.

В работе [18] показано, что процессы старения битумов под влиянием кислорода воздуха и температуры сводятся к возникновению, развитию и разрушению в его объеме коагуляционных структур. Было выдвинуто предположение, что добавки ароматических и алифатических аминов, адсорбционно стабилизирующих асфальтены, препятствуют структурообразованию и способны замедлить старение битумов.

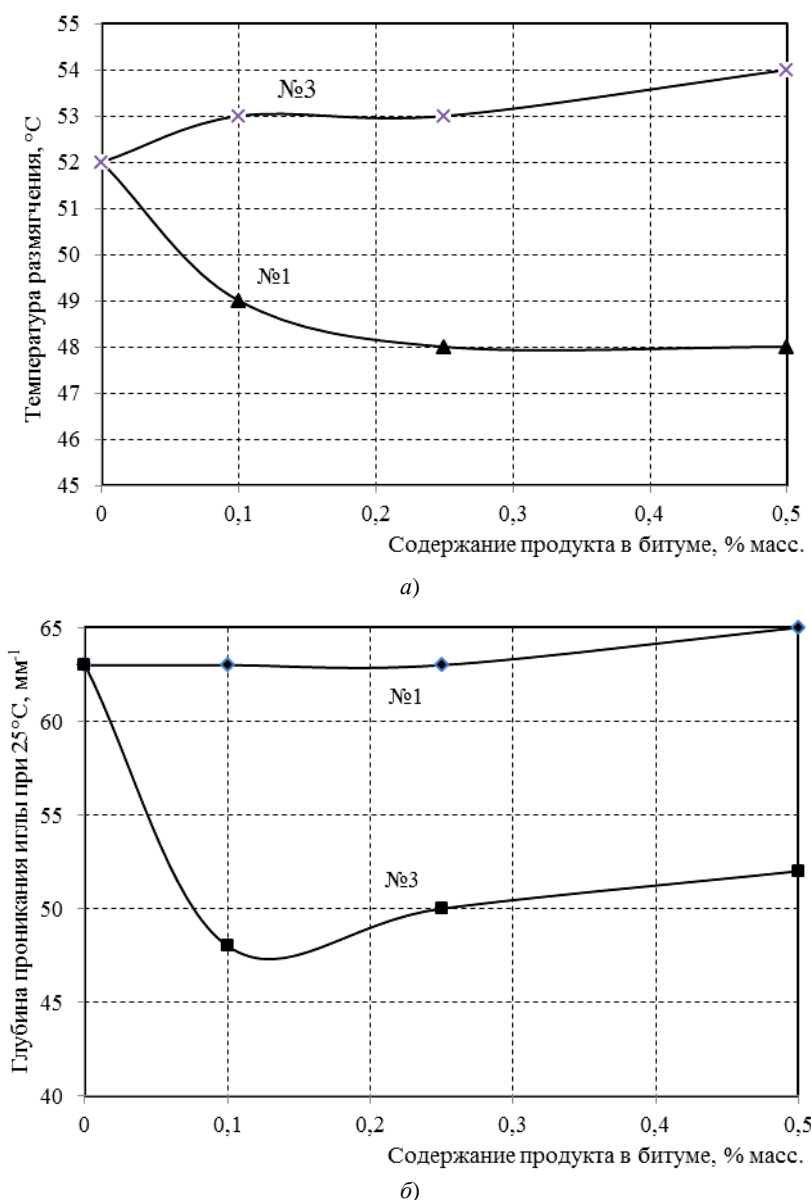


Рис. 2. Влияние содержания продуктов № 1 и № 3 на температуру размягчения (а) и глубину проникания иглы (б) нефтяного окисленного битума

Устойчивость к термоокислительному старению модифицированных присадками битумов согласно СТБ 1463-2011 [19] оценивается по изменению разности температур размягчения и глубины проникания иглы при 25 °С исходного и активированного битума после прогрева при температуре (160 ± 5) °С в течение 30 часов. Результаты изучения влияния исследуемых продуктов на устойчивость битума к термоокислительному старению приведены в таблице 2.

Установлено, что в результате термообработки исходного битума его температура размягчения увеличилась на 13 °С, а глубина проникания иглы снизилась на 57 мм^{-1} , т.е. на 25 и 90,5 % соответствен-

но. Индекс пенетрации, характеризующий изменение коллоидной структуры битумов, уменьшился более чем в 11 раз. Согласно [18] это свидетельствует о наступлении заключительного 3 этапа старения битума, который связан с разупрочнением и разрушением его коагуляционной структуры за счет возникающих в отдельных узлах и элементах структурной сетки высоких внутренних напряжений и недостатка дисперсионной среды для стабилизации вновь образующихся асфальтенов.

Таблица 2

Изменение свойств исходного и активированного исследуемыми продуктами битума в результате термообработки в течение 30 часов при температуре $(160 \pm 5) ^\circ\text{C}$

Наименование показателя	Исходный битум	Битум + 0,5 % масс. продукта		Битум + 0,3 % масс. экстракта и 0,2 % масс. продукта	
		№ 1	№ 3	№ 1	№ 2
Потеря массы, %	0,03	0,07	0,09	0,02	0,02
Температура размягчения, $^\circ\text{C}$					
- до термообработки	52	48	54	52	52
- после термообработки	65	61	74	55	54
- изменение абсолютное	плюс 13	плюс 13	плюс 20	плюс 3	плюс 2
Изменение разности температур размягчения исходного и активированного битума после прогрева, $^\circ\text{C}$	–	0	плюс 7	минус 10	минус 11
Глубина проникания иглы (пенетрация) при 25°C , мм^{-1}					
- до термообработки	63	65	52	97	61
- после термообработки	6	21	10	44	47
- изменение абсолютное	минус 57	минус 44	минус 42	минус 53	минус 14
Изменение разности глубины проникания иглы для исходного и активированного битума после прогрева, мм^{-1}	–	минус 13	минус 15	минус 4	минус 43
Индекс пенетрации					
- до термообработки	минус 0,14	минус 1,09	минус 0,15	плюс 1,12	минус 0,23
- после термообработки	минус 1,79	минус 0,61	плюс 0,197	минус 0,32	минус 0,39
- изменение абсолютное	минус 1,65	плюс 0,48	плюс 0,35	минус 1,44	минус 0,16
- изменение в % отн.	минус 1141,6	плюс 44,2	плюс 228,7	минус 128,6	минус 69,6

Введение в битум 0,5 % масс. продукта № 1 не повлияло на изменение температуры размягчения в результате термообработки, но уменьшило изменение глубины проникания иглы. Значение индекса пенетрации при этом возросло на 44,2 %. Введение в битум 0,5 % масс. продукта № 3 привело в результате термообработки к значительному росту температуры размягчения на $20 ^\circ\text{C}$, но при этом отмечено снижение изменения глубины проникания иглы по сравнению с исходным битумом на 15 мм^{-1} , или на 9,7 %. Значение индекса пенетрации при этом возросло на 228,7 %.

Таким образом, введение в битум исследуемых продуктов способствует формированию в нем устойчивых к разрушению коагуляционных структур. При этом наличие в продукте производных гуминовых веществ торфа, проявляющих склонность к коагуляционному взаимодействию, усиливает структурообразование в битуме. Согласно требованиям СТБ 1463-2011, предъявляемым к адгезионным присадкам для дорожных битумов по показателю «Влияние присадки на устойчивость битума к термоокислительному старению», продукт № 1 соответствует марке АП «адгезионная присадка, не снижающая интенсивность термоокислительного старения». Продукт № 3 соответствует требованиям, предъявляемым к стабилизирующей присадке марки АПС по показателю «Изменение разности глубины проникания иглы для исходного и активированного битума после прогрева», но не соответствует требованиям СТБ 1463-2011 по изменению температуры размягчения. Было выдвинуто предположение, что причиной недостаточной устойчивости к термоокислительному старению активированного исследуемыми продуктами битума является их избыток в системе, что приводит не только к стабилизации компонентов дисперсной фазы исходного битума, но и к формированию новых пространственных коагуляционных структур. В связи с этим с целью снижения структурирующего действия исследуемых продуктов было предложено снизить содержание в них активного компонента с 0,5 до 0,2 % масс. и ввести в их состав пластифицирующую добавку – остаточный экстракт селективной очистки масел. Кроме того, продукт № 3 был заменен продуктом № 2, содержащим в 2 раза меньше производных гуминовых веществ торфа.

Установлено, что введение в битум 0,2 % масс. продукта № 1 с 0,3 % масс. экстракта позволило снизить изменение температуры размягчения при термообработке на $10 ^\circ\text{C}$, или с 25 до 5,8 % отн. При

этом изменение глубины проникания иглы битума уменьшилось с 90,5 до 54,64 %, а изменение индекса пенетрации по сравнению с исходным битумом уменьшилось в 8,9 раза. Добавление к продукту № 1 экстракта позволило значительно улучшить устойчивость битума к изменению температуры размягчения в результате термообработки. Однако это привело к резкому ухудшению показателя «Изменение разности глубины проникания иглы для исходного и активированного битума после прогрева», который для присадки марки АПС согласно СТБ 1463-2011 должен снижаться не менее чем на 15 мм⁻¹.

Эффективной стабилизирующей добавкой к дорожному битуму является продукт № 2. Так, при введении его в битум в количестве 0,2 % масс. с 0,3 % масс. экстракта отмечается снижение изменения температуры размягчения активированного битума по сравнению с исходным на 11 °С, а глубины проникания иглы на 43 мм⁻¹, т.е. продукт № 2 полностью соответствует требованиям, предъявляемым к стабилизирующим присадкам марки АПС согласно СТБ 1463-2011.

Анализ изменения индекса пенетрации исходного и активированного битума в результате термообработки показал, что относительная эффективность продукта № 2 по стабилизации коллоидной структуры битума по сравнению с продуктом № 1 выше в 1,85 раза. При этом основной вклад в активность присадки вносят компоненты продукта № 2, а не экстракт. Так, дополнительное введение 5 % масс. экстракта в уже активированный продуктом № 2 битум приводит к незначительному снижению устойчивости битума к термоокислительному старению – изменение разности температур размягчения и глубины проникания иглы исходного и активированного битума после прогрева снижается на 8 °С и 36 мм⁻¹ соответственно, т.е. присадка сохраняет соответствие марке АПС. Однако при этом наблюдается резкое снижение индекса пенетрации активированного битума до минус 1,66, что не соответствует требованиям ГОСТ 22245-90.

Изучение адгезионных свойств исходного и активированных битумов проводилось по методу А ГОСТ 11508-74 «Битумы нефтяные. Методы определения сцепления битума с мрамором и песком». В свежеприготовленных образцах битумно-минеральных смесей поверхность минералов полностью покрыта битумом. Они соответствуют контрольному образцу № 1 ГОСТ 11508-74. В результате обработки по методу А на образцах, полученных с использованием исходного битума, наблюдается практически полное его смывание с поверхности частиц песчано-гравийной смеси – соответствие контрольному образцу № 3 ГОСТ 11508-74, и незначительная потеря битума с поверхности частиц мрамора – соответствие контрольному образцу № 2 ГОСТ 11508-74. При добавлении исследуемых продуктов наблюдается значительное улучшение адгезионных свойств битума. В результате обработки по ГОСТ 11508-74 (Метод А) поверхность частиц мрамора полностью покрыта битумом и соответствует образцу № 1, а поверхность частиц песчано-гравийной смеси остается покрытой битумом более чем на $\frac{3}{4}$ и соответствует контрольному образцу № 2.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- в результате взаимодействия рапсового масла и гуминовых веществ торфа с ДЭТА получают продукты, потенциально пригодные для использования в качестве присадок к битумам;
- продукты взаимодействия рапсового масла с ДЭТА оказывают на нефтяные битумы пластифицирующее действие;
- введение в состав продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА гуминовых веществ торфа приводит к коренным изменениям характера его влияния на свойства битума, способствует повышению его теплостойкости, оказывая на битум выраженное структурирующее действие;
- присадка, полученная при взаимодействии гуминовых веществ торфа с рапсовым маслом и ДЭТА, соответствует требованиям СТБ 1463-2011, предъявляемым к стабилизирующей адгезионной присадке марки АПС. Присадка, не содержащая гуминовых веществ торфа, соответствует требованиям СТБ 1463-2011, предъявляемым к присадке марки АП;
- стабилизирующее действие присадки, содержащей гуминовые вещества торфа, проявляется только при определенном её содержании в битуме (около 0,2 % масс.) и наличии пластификатора;
- продукты взаимодействия рапсового масла и гуминовые вещества торфа с ДЭТА повышают степень сцепления битума с поверхностью как кислых, так и щелочных минеральных материалов.

Таким образом, результаты исследований показали принципиальную возможность использования гуминовых веществ торфа в качестве компонента присадок к дорожным битумам. Выявлено выраженное усиление стабилизирующего действия присадок, содержащих продукты взаимодействия гуминовых веществ и рапсового масла с ДЭТА, на свойства и коллоидную структуру активированных ими дорожных битумов под воздействием повышенных температур и кислорода воздуха. На основании полученных результатов подана заявка на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуреев, А.А. Производство нефтяных битумов / А.А. Гуреев. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2007. – 102 с.

2. Худякова, Т.С. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами / Т.С. Худякова, А.Ф. Масюк, В.В. Калинин // Дорожная техника: ежегодный каталог-справочник. – СПб.: Издат. дом «СЛАВУТИЧ», 2003. – С. 174 – 181.
3. Адгезионные добавки для битума: техн. бюл. компании AkzoNobel, 2010. – 28 с.
4. Ядыкина, В.В. Повышение качества асфальто- и цементобетона из техногенного сырья с учетом состояния его поверхности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / В.В. Ядыкина. – Белгород, 2004. – 42 с.
5. Кемалов, А.Ф. Интенсификация производства окисленных битумов и модифицированные битумные материалы на их основе: дис. ... д-ра техн. наук: 02.00.13 / А.Ф. Кемалов. – Казань, 2005. – 354 с.
6. Якимович, И.В. Асфальтобетон с адгезионной добавкой ДАД-1: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И.В. Якимович. – Белгород, 2009. – 178 с.
7. Кортянович, К.В. Улучшение свойств дорожных битумов модифицирующими добавками: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / К.В. Кортянович. – Уфа, 2007. – 143 с.
8. Способ получения адгезионной битумной присадки: пат. РФ № 2192438, МПК C08L 95/00 / Андрианов В.М., Гелев А.Б., Бурган С.Т., Кутьин Ю.А., Викторова Г.Н., Телицкий В.Б. (RU). – № 2001119672/04; заявл. 16.07.2001; опубл. 10.11.2002 // Бюл. № 11.
9. Способ получения адгезионной битумной присадки: пат. РФ № 2326144, МПК C08L 95/00, C04B 26/26, C07C 231/00 / Викторова Г.Н., Кутьин Ю.А., Мавлютов А.Ф., Скарлыккина А.П., Галеев Т.В. (RU). – № 2006141569/04; заявл. 14.11.2006; опубл. 10.06.2008 // Бюл. № 16.
10. Катионактивная адгезионная присадка к битумам и способ её получения: пат. РФ № 2374280, МПК C08L 95/00, C04B 26/26 / Ганиева Т.Ф., Кемалов А.Ф., Фахрутдинов Р.З., Кемалов Р.А., Дияров И.Н., Надыршин Р.Г., Ахметова А.Н. (RU). – № 2007143424/04; заявл. 23.11.2007; опубл. 27.11.2009 // Бюл. № 33.
11. Кучма, М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве / М.И. Кучма. – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.
12. Ермак, А.А. Влияние продукта взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином на свойства дорожного битума / А.А. Ермак, Е.В. Михайловский, И.А. Мандрика // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 113 – 117.
13. Ковалев, Я.Н. Применение торфа как активизирующей добавки в асфальтобетон / Ковалев Я.Н., С.С. Будниченко // Строительная наука и техника. – 2009. – № 3. – С. 12 – 16.
14. Стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси на основе торфа (варианты) и способ получения для него структурообразователя: пат. РФ № 2479524, МПК C04B 26/26, C08L 95/00 / Кудряшов А.П., Кудряшов И.В., Кудряшов П.А., Гермашев В.Г., Ядыкина В.В. (RU). – № 2011126791/03; заявл. 29.06.2011; опубл. 20.04.2013 // Бюл. № 11.
15. Ермак, А.А. Вяжущие материалы на основе торфо-нефтяных композиций: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / А.А. Ермак. – Новополоцк, 1998. – 109 с.
16. Орлов, Д.С. Гуминовые вещества в биосфере / Д.С. Орлов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С. 56 – 63.
17. Янута, Ю.Г. Получение и регулирование свойств сорбционных материалов на основе гуминовых веществ торфа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Ю.Г. Янута. – Минск, 2006. – 19 с.
18. Колбановская, А.С. О механизме старения битумов разной структуры / А.С. Колбановская, А.Р. Давыдова, К.И. Давыдова // Докл. Акад. наук СССР. – 1965. – Т. 165, № 2. – С. 376 – 379.
19. Присадки адгезионные для дорожных битумов. Общие технические условия: СТБ 1463-2011 / Госстандарт Респ. Беларусь. – Введ. 01.07.2011. – Минск: ГП «БелдорНИИ», 2011 – 18 с.

Поступила 06.06.2013

PROSPECTS FOR THE USE OF PEAT HUMIC SUBSTANCES AS AN ADDITIVE COMPONENT TO ROAD BITUMEN

A. YERMAK, I. BORODIY, E. MIKHAILOVSKY

The requirements to be met by additives to road bitumen are considered. A component structure of humic substances and methods of their extraction from peat are presented. The suitability of peat humic substances for use as raw component in the synthesis of additives for road bitumen with rapeseed oil and diethylenetriamin is demonstrated. A probable chemical composition of the resultant product was supposed. It is shown, that the reaction product of humic substances of peat with rapeseed oil and diethylenetriamine gives road bitumen expressed structuring and stabilizing effect, slows its thermo-oxidative aging. It is established, that the synthesized product increases the adhesion to the surface of the bitumen as acid, alkali and mineral materials.

УДК 665.61:503.36

СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРИРОДНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗО-И ЛИГНИНСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ СБОРА ПРОЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ, Ю.А. БУЛАВКА,
Л.А. ПОПКОВА, С.С. ПИСАРЕВА
(Полоцкий государственный университет)*

Исследована возможность использования в качестве сорбентов для ликвидации нефтяных разливов целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности. Выполнен сравнительный анализ отобранных образцов с промышленно производимыми аналогами на основе торфа. Изучена сорбционная способность древесных отходов и отходов растениеводства по отношению к легкой нефти и нефтепродуктам с различной плотностью (к керосину, дизельному топливу, масляному погону). Обнаружены факторы, влияющие на сорбционные свойства образцов: степень измельчения исходного сырья и содержания целлюлозы, плотность сорбтива. Установлено, что перспективно и экономически целесообразно направление утилизации местных крупнотоннажных целлюлозо- и лигнинсодержащих древесных отходов и отходов растениеводства в качестве сорбента в технологических процессах удаления нефти и нефтепродуктов благодаря низкой стоимости и широкой сырьевой базе, достаточной нефтеемкости и гидрофобности, возможности использования насыщенных углеводородами сорбентов без повторного загрязнения природных объектов.

Введение. Нефтяные загрязнения окружающей среды во многом выделяются среди прочих. Известно, например, что литр нефти лишает кислорода 40 тысяч литров воды, тонна нефти загрязняет 12 кв. км водной поверхности. Содержание в воде нефтепродуктов выше 0,1 мг/л придает мясу рыб неустрашимый ни при каких технологических обработках привкус и специфический запах нефти. Нефтепродукты в почве необратимо угнетают развитие растений при концентрации свыше 2 г на 1 кг почвы (порог фитотоксичности), происходят задержка или полное выпадение фенофаз в развитии растений, морфологические изменения растений, на 20...30 дней задерживается начало вегетации [1]. Не последнее место среди средств ликвидации нефтяных разливов занимают так называемые нефтяные сорбенты – материалы, способные впитывать в больших количествах нефтепродукты, препятствуя тем самым их миграции в окружающей среде [2].

На отечественном и зарубежном рынках имеется большое разнообразие сорбционных материалов для ликвидации нефтяных разливов. Сорбенты создаются на основе различных органических и неорганических материалов. Многие из них являются достаточно эффективными и обладают высокой сорбционной емкостью, однако энергетические и материальные затраты на их производство определяют высокую стоимость продукта, что зачастую не удовлетворяет требованиям потребителей. Вместе с тем перспективные и экономически выгодные сорбенты представляется возможным изготавливать из местного вторичного сырья. В последние годы активно ведутся разработки по получению нефтяных сорбентов для сбора проливов углеводородов на основе отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности, использование этого типа сырья обусловлено достаточно высокой поглощающей способностью получаемых сорбентов, их низкой стоимостью, доступностью как местного материала и возможностью дальнейшего применения. Основные компоненты таких отходов представлены в таблице 1 [3 – 5].

Таблица 1

Основные компоненты растительной биомассы

Вид сырья	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Зольные вещества
Солома пшеницы	34,8...49,2	24,5	19...30	4,6...5,5
Солома ржи	40,4...49,3	22,9	27,7...28,8	3,1...4,1
Солома риса	42,9	17,9	27,1	15,3
Стебли ярового рапса	30,7	18,5	20,2	10,9
Кора сосны	17,6...18,8	38,2...44,7	6,5...14,4	1,1...1,8
Опилки сосны	53,18... 55,08	28,45... 29,48	10,85... 13,25	0,17...0,2

Повышенный интерес к целлюлозосодержащему растительному сырью обусловлен тем, что целлюлоза имеет сложную надмолекулярную структуру, минимальными структурными элементами целлюлозного волокна являются микрофибриллы, состоящие из нескольких сотен макромолекул целлюлозы. Микрофибриллы имеют аморфно-кристаллическое строение. Кристаллические участки ответственны за

прочность, аморфные – за сорбционную способность волокон [6]. Аморфная область целлюлозы в целом формируется поверхностными молекулами ее микрофибрилл и их фрагментов, обладающих полимикрорекристаллической пористой структурой [7 – 8]. Одной из основных составляющих растительной биомассы также является лигнин, который придает жесткость клеточным стенкам и действует как межклеточное связующее вещество. Структура растительных материалов характеризуется наличием пор, относящихся к гетеропористым, радиус кривизны которых меняется в широком диапазоне, пористость анизотропная, кроме того, присутствуют полости между структурными элементами, открытые (сообщающиеся) поры-каналы, пронизывающие весь ее объем, и не сообщающиеся поры-ячейки [9].

Цель исследования – установление сорбционных свойств местных древесных отходов и отходов растениеводства, оценка пригодности их использования для сорбции нефти и нефтепродуктов с различных поверхностей.

Объекты и методы исследований. В качестве объекта исследования выбраны опилки и кора сосны *Pinus silvestris*, солома злаковых культур в виде топливных гранул (пеллет) и околоплодники рапса (*Brassica napus*) и редьки (*Raphanus*). Высушенное сырье подвергалось механической обработке (измельчение проводилось до гранулометрического состава до 1,0 мм) и сухому фракционированию на лабораторных ситах (в соответствии с ГОСТ 12536-79). Часть образцов в течение 1 часа обработали 1,5 %-ным раствором гидроксида натрия в соответствии с общепринятой в химии древесины методикой [10].

Для анализа сорбционной способности выбраны нефтепродукты, производимые на ОАО «Нафтан»: вакуумный дистиллят 4-го погона (ВД-4), дизельное топливо (ДТ) и керосин осветительный (марки КО-20) с различной плотностью 890, 831 и 775 г/см³ при 20 °С соответственно. Для изучения нефтеемкости выбрана легкая нефть плотностью 848 г/см³ при 20 °С. Для определения сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам образцов их точные навески (около 1 г) насыпали в стеклянные цилиндры с дном из капроновой сетки. Цилиндры помещали в сорбтив. Контактное взаимодействие образцов с углеводородами проводили в течение суток. Затем цилиндры вынимали, давали стечь избытку нефтепродукта в течение 10 минут и взвешивали на аналитических весах в предварительно тарированном стакане на 50 см³. Количество поглощенного углеводорода определяли гравиметрическим методом [11]. Водопоглощение образцов определяли по ГОСТ 24160-80, а плавучесть и степень отжима – по методикам, приведенным в [12].

Результаты и их обсуждение. Поглощающая способность по отношению к нефти и нефтепродуктам сорбентов в нативном виде фракций 0,25...1 мм, полученных из отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности, представлена на рисунке 1 в виде графической зависимости изменения сорбционной способности от плотности сорбтива (на рисунке не показана нефтеемкость сорбентов из отходов растениеводства – соломы и околоплодников рапса и редьки).

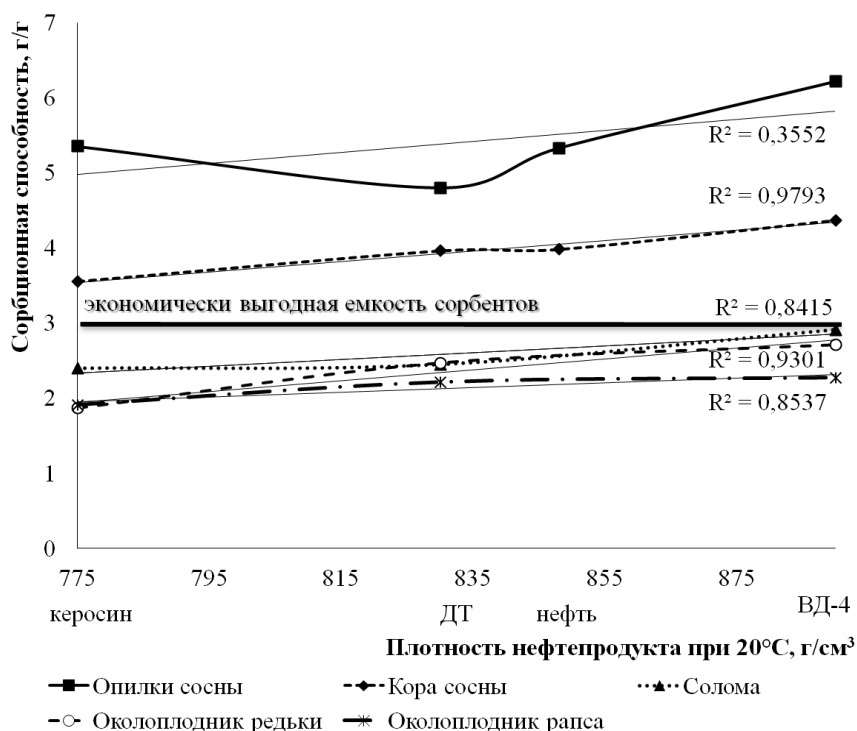


Рис. 1. Сорбционная способность по отношению к нефти и нефтепродуктам сорбентов в нативном виде

Анализ сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам сорбционных материалов в нативном виде показал, что исследуемые образцы можно отнести к объемно-пористым сорбентам, поглощающим поллютант за счет капиллярных сил и удерживающим его в объеме за счет адгезии. Кроме того, установили ряд закономерностей:

- для большинства образцов установлена линейная зависимость (величина достоверности аппроксимации R^2 близка к единице) – увеличение плотности нефтепродукта приводит к возрастанию сорбционной способности, вероятно, тяжелые нефтяные фракции поглощаются всеми образцами значительно эффективнее, чем легкие, в связи с увеличением энергии адгезионной связи сорбируемого вещества с поверхностью сорбции и различиями в физико-химических свойствах этих нефтепродуктов;

- поглощающая способность сорбентов на основе древесных отходов коррелирует с содержанием целлюлозы в сорбенте: чем выше содержание целлюлозы, тем больше степень поглощения нефтепродукта;

- экономически эффективная сорбционная способность (свыше 3,0 г/г) установлена для опилок и коры сосны, замечено, что отходы деревообработки в два раза более эффективны, чем отходы растениеводства при поглощении различных нефтепродуктов (керосина, ДТ и ВД-4).

Однако установлено, что отходы растениеводства показывают высокие результаты по сорбции нефти в отличие от других нефтепродуктов. На рисунке 2 представлены результаты анализа сорбционной способности по отношению к нефти (а) и ДТ (б) сорбентов в нативном виде и после обработки раствором щелочи.

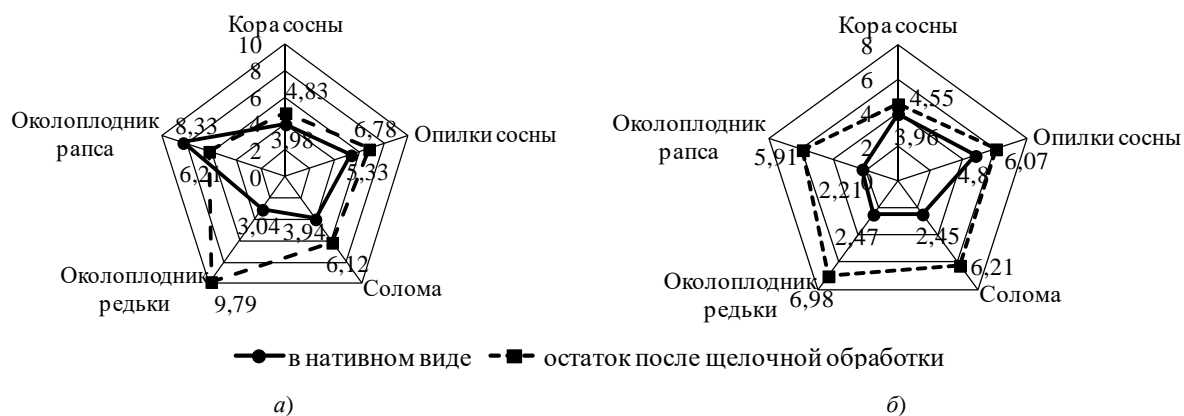


Рис. 2. Сорбционная способность по отношению к нефти (а) и ДТ (б) сорбентов

Способность к сорбции нефти у соломы злаковых культур в нативном виде, как видно из рисунка 2, в 1,6 раза выше, чем к ДТ, а у околоплодника рапса в 3,8 раза больше поглощается нефти, чем ДТ при близкой плотности сорбтива. Данный факт может быть обусловлен высоким содержанием липофильных веществ в отходах растениеводства. К примеру, по литературным данным [13], известно, что в стебле рапса содержится около 16 % от массы абсолютно сухого сырья липофильных (смолистых) веществ различной природы. Это ароматические, терпеновые углеводороды и их производные, жиры, воски, спирты, альдегиды и др. Общеизвестно, что при контакте твердых олеофильных частиц с большим количеством нефти вокруг них образуются мицеллы, взаимодействующие между собой с образованием своеобразной сетчатой структуры, что значительно увеличивает вязкость суспензии в целом, приводя при достижении больших концентраций сорбентов в нефти к образованию достаточно плотных конгломератов. Особое взаимодействие смолистых веществ околоплодника рапса с нефтью подтверждает факт снижения нефтеемкости более чем на 2 г/г после щелочной обработки образца, поскольку значительная часть липофильных веществ при такой обработке извлекается.

Замечено, что после экстрагирования щелочью сорбционная способность по отношению к дизельному топливу и нефти древесных отходов увеличилась на 15...27 %, а для соломы и околоплодника редики в 1,6...3,2 раза. Данный факт, вероятно, связан с тем, что реагентная обработка растительного сырья позволяет увеличить долю аморфных зон целлюлозы, что положительно сказывается на повышении удельной поверхности и адсорбционной способности материала.

Сорбционная способность образцов существенно зависит от степени измельчения исходного сырья. Например, изучена поглотительная способность по отношению к дизельному топливу фракций коры сосны в нативном виде различного гранулометрического состава: менее 0,14; 0,14...0,315; 0,315...0,63; 0,63...1 мм, результаты анализа представлены на рисунке 3. Установлено, что наилучшие показатели характерны для фракции 0,14...0,315 мм, что, возможно, связано с тем, что в процессе измельчения и

последующего фракционирования коры сосны достигли максимального увеличения площади поверхности и, как следствие, поглощательные способности.

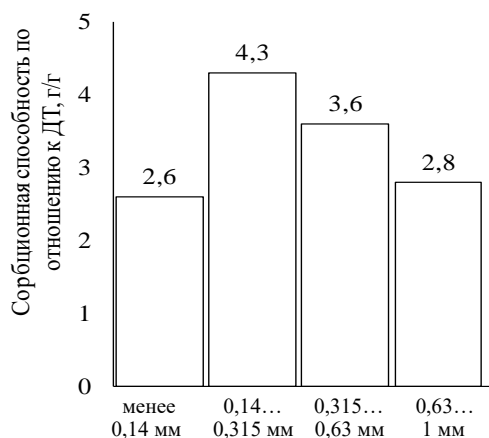


Рис. 3. Зависимость сорбционной способности коры сосны в нативном виде по отношению к ДТ от гранулометрического состава

К числу основных показателей эффективности сорбентов, кроме нефтеемкости, относят водопоглощение и плавучесть, которые при ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на водных поверхностях имеют особенно важное значение, так как потопление нефтепродуктов из-за большого экологического риска недопустимо. Основные сорбционные свойства изучаемых образцов в нативном виде фракций 0,25...1 мм, которые могут непосредственно использоваться при сборе нефти и нефтепродуктов или служат основой для получения нефтяных сорбентов, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика основных сорбционных свойств образцов

Показатель для фракции 0,25...1 мм	Отходы обработки сосны <i>Pinus silvestris</i>		Солома злаковых культур	Околоплодник редьки <i>Raphanus</i>	Околоплодник рапса <i>Brassica napus</i>
	кора	опилки			
Нефтеёмкость, г/г	3,98	5,33	3,94	3,04	8,33
Водопоглощение г/г	3,32	6,87	5,21	7,06	4,09
Степень отжима, % масс.	25,1	22,4	19,1	36,7	22,4
Плавучесть (за 24 часа), %	75	менее 1	2	менее 1	10

Из таблицы 2 видно, что для всех изучаемых образцов растительного происхождения характерны высокие показатели водопоглощения, что связано с наличием большого количества сильнополярных групп, таких как ОН, СООН и др., создающих значительное свободное силовое поле. Для устранения этого явления можно осуществлять гидрофобизацию поверхности, к примеру, хорошие водоотталкивающие свойства составу придают полиметилсилоксановая жидкость, парафин и др.

Анализ плавучести показал, что высокой плавучестью обладает кора сосны (более 72 ч), ограниченной плавучестью (3...72 ч) – солома злаковых культур и околоплодники рапса и редьки, а неплавучие свойства проявили опилки сосны (до 3 ч). Высокая плавучесть коры сосны обусловлена наличием достаточного количества хвойного воска, обладающего гидрофобными свойствами. Следует отметить, что материалы с низкой плавучестью (опилки сосны и др.) при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на водных поверхностях могут эффективно использоваться в изделиях с армирующей оболочкой – бонах, матах и др.

Сорбенты на основе изученных местных древесных отходов и отходов растениеводства могут рассеиваться при очистке различных загрязненных поверхностей от поллютанта вручную, механическими или пневматическими устройствами, далее собранный конгломерат из пропитанного углеводородами сорбента может подвергаться извлечению нефти (нефтепродукта) компрессионными методами (отжим на фильтрпрессах, в центрифугах). Насыщенные углеводородами (отработанные) сорбенты после механического отжима могут быть использованы в качестве топливных брикетов с повышенной теплотворной

способностью или в качестве смолистых добавок в асфальтовые смеси или кровельные материалы, что не приведет к повторному загрязнению природных объектов.

Следует отметить, что в комплексном критерии эффективности использования нефтяных сорбентов учитываются не только их сорбционные характеристики, но и затраты на их производство, транспортные издержки, сложность нанесения на загрязненные поверхности с учетом характерных особенностей рельефа загрязненных участков, особенности применения в различных климатических условиях, биосферная совместимость, технические решения утилизации нефтенасыщенных материалов и др.

Благодаря экологической чистоте, широкой сырьевой базе, гидрофобности и нефтеемкости при сравнительно низкой стоимости сорбенты на основе отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности могут успешно конкурировать с промышленно производимыми аналогами (табл. 3) [14]. Производство сорбентов с использованием сырья некачественного применения позволит расширить ассортимент нефтепоглотителей, снизить нагрузку на окружающую среду и получить экономический эффект.

Таблица 3

Характеристика промышленно производимых природных органических нефтяных сорбентов

Наименование сорбента (страна-производитель)	Основа сорбента	Плотность, см ³ /г	Нефте-ёмкость, г/г	Водо-поглощение, г/г	Способ утилизации	Цена, (у.е./т)
Питсорб (Канада)	Торф	0,16	4	1,64	Сжигание, захоронение	7000
Турбоджет (Франция)	Торф	0,11	3,6	2,03	Сжигание	5800
Сибсорбент (Россия)	Торф, сапрпель	0,17	2...4	0,5	Сжигание, захоронение	2500
БТК-1 (Россия)	Торф	0,11	11	5,21	Сжигание	7000
Сорбойл (Россия)	Торф	0,2...0,3	8	–	Сжигание	2800
Лессорб (Россия)	Мох	0,091	9...11	3,6	Сжигание	1900
Эколан (Россия)	Продукт пиролиза древесины	0,25	8	0,05	Сжигание, захоронение	1600
Сорбенты растительного происхождения (Россия)	Лузга гречихи, риса	0,15	4,5	–	Сжигание	2000...10000
Экограннефторф (Беларусь)	Торф	0,13...0,16	3...5	1,26	Сжигание, захоронение	1000

Выводы. Перспективно и экономически целесообразно направление утилизации местных крупнотоннажных целлюлозо- и лигнинсодержащих древесных отходов и отходов растениеводства в качестве недорогого сорбента в технологических процессах очистки, концентрирования и удаления нефти и нефтепродуктов в силу следующих факторов:

- исследуемые отходы лесной и сельскохозяйственной промышленности имеют капиллярно-пористое строение;

- значения нефтеемкости исследуемых образцов не уступают показателям некоторых промышленных сорбентов на основе торфа («Питсорб», «Турбоджет», «Сибсорбент», «Экограннефторф» и др.);

- материалы на основе древесных отходов (кора и опилки сосны) могут использоваться в качестве универсальных сорбентов для поглощения нефтепродуктов различной плотности (керосина, дизельного топлива, масляных погонов и нефти), а сорбенты на основе отходов растениеводства (солома злаковых культур и околоплодники рапса и редьки) рекомендуется применять для сбора проливов нефти;

- анализ сорбционной способности показал, что исследуемые материалы пригодны для сбора проливов нефти и нефтепродуктов как в необработанном (нативном) виде, так и в виде остатка, подвергнутого обработке слабым раствором щелочи. Ряд ценных химических продуктов может быть получен при извлечении экстракцией слабым раствором гидроксида натрия из исследуемых отходов, например, экстрактивные вещества из коры сосны могут найти применение в производстве дубителей и красящих веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гридин, О.М. Семь раз отмерить. Рекламные иллюзии и реальные перспективы применения нефтяных сорбентов / О.М. Гридин, В.Ж. Арнс, А.О. Гридин // Нефтегазовая вертикаль. 2000. – № 9. – С. 28 – 32.
2. Сорбционный метод ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Н.А. Самойлов [и др.]. – М.: Химия, 2001. – 189 с.

3. Чупрова, Н.А. Химический состав коры хвойных пород Сибири / Н.А. Чупрова, Н.Д. Барабаш, Э.Д. Левин // Изучение и использование древесной коры: тез. докл. I Всесоюз. конф., Красноярск, 1 – 3 дек. 1977 г. – Красноярск, 1977. – С. 8 – 10.
4. Хлёткин, Р.Н. О ликвидации разливов нефти при помощи растительных отходов / Р.Н. Хлёткин, Н.А. Самойлов // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 7. – С. 84 – 85.
5. Дивина, Е. Шелуха спасёт природу / Е. Дивина // Слово Нефтяника. – 2003. – № 1. – С. 2.
6. Кудайбергенов, К.К. Углеродные сорбенты для ликвидации аварийных розливов нефти / К.К. Кудайбергенов, Е.К. Онгарбаев, З.А. Мансуров // Физика и химия углеродных материалов. Наноинженерия: материалы VI Междунар. симпоз. – Алматы, 2010. – С. 119 – 122.
7. Изучение структуры и сорбционных свойств некоторых видов целлюлозы / Л.Г. Смирнова [и др.] // Коллоидный журнал. – 2003. – Т. 65, № 6. – С. 11– 14.
8. Chanzy, H. Aspects of cellulose structure / H. Chanzy // In Cellulose Sources and Exploitation: industrial utilisation biotechnology and physico-chemical properties (J.F. Kennedy, G.O. Phillips and P.A. Williams, eds). – New York: Ellis Horwood Limited, 1990. – P. 3 – 12.
9. Особенности микроструктуры отходов сухой окорки сосны как сырья для получения нефтяных сорбентов / С.Ф. Якубовский и [др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011, № 11. – С. 154 – 157.
10. Оболенская, А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов / А.В. Оболенская и [др.]. – М.: «Экология», 1991. – 320 с.
11. Семенович, А.В. Сбор проливов нефтепродуктов модифицированной корой хвойных пород / А.В. Семенович, С.Р. Лоскутов, Г.В. Пермьякова // Химия растительного сырья. – 2008. – № 2. – С. 113 – 117.
12. Каменщиков, Ф.А. Нефтяные сорбенты / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 268 с.
13. Туева, И.А. Фитохимическое исследование отходов переработки крупяных и масличных культур и получение на их основе биологически активных комплексов: автореф. дис. ... канд. фарм. наук / И.А. Туева. – Томск, 2006. – 24 с.
14. Артемов, А.В. Сорбционные технологии очистки воды от нефтяных загрязнений / А.В. Артемов, А.В. Пинкин // Вода: химия и экология. – 2008. – № 1. – С. 19 – 25.

Поступила 20.06.2013

SORPTION CAPACITY OF NATURAL CELLULOSE AND LIGNIN-CONTAINING WASTE FOR OIL SPILL REMEDIATION

S. JAKUBOWSKI, Y. BULAUKA, L. POPKOVA, S. PISAREVA

The possibility of vegetal waste materials using as sorbents for water and land-based purification from crude oil and oil products was investigated. The comparative analysis of the most common natural organic sorbents with the waste processing of woody and non-wood materials is given. Using kerosene, diesel, vacuum distillate and oil an evaluation was made of the effectiveness of the sorbent materials for a range of hydrocarbon products that are likely to be involved in oil spills. It was found that the sorption capacity of the vegetal waste materials depended upon the density of hydrocarbon materials, the degree of crushing vegetal waste and the cellulose content in the sorbent. Thus the use of vegetal waste materials for cleaning up oil spills is feasible due to its many desirable properties such as high hydrocarbon sorption, hydrophobicity, lowest cost and the possibility of rational recyclability.

УДК 687.03:677.072.6 – 037.4

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА
ВЕРХА СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ
ОТ ПОВЫШЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В.П. ДОВЫДЕНКОВА, канд. техн. наук, проф. В.И. ОЛЬШАНСКИЙ

(Витебский государственный технологический университет);

канд. техн. наук Н.М. ДМИТРАКОВИЧ, Е.В. МАЦКЕВИЧ

(Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь)

Рассматривается аналитическое решение задачи по определению закономерности распределения температуры на внутренней поверхности материала верха специальной защитной одежды пожарных тяжёлого типа в радиальном направлении с течением времени. Огнетермостойкий материал с металлизированным покрытием рассматривается как неограниченная пластина, теплоизолированная с внутренней стороны за счёт полного теплового контакта между слоями материала. Получена формула для расчёта разности температур на внутренней поверхности материала верха специальной защитной одежды пожарных тяжёлого типа в местах его перфорации иглой швейной машины (в окошечной зоне).

Введение. Проблема комплексной защиты пожарных от вредных и опасных факторов пожара, климатических воздействий, химических агрессивных сред и ионизирующих излучений относится к числу тех вопросов, актуальность решения которых сохраняется до настоящего времени.

Специальная защитная одежда пожарных от повышенных тепловых воздействий (далее – ОСЗ ПТВ) является одной из важнейших составляющих, обеспечивающих безопасные условия труда.

Согласно СТБ 1972 [1] наружная оболочка одежды должна изготавливаться из материалов с металлизированным покрытием с высокой степенью отражения инфракрасного излучения, способных обеспечить защиту от воздействия интенсивного теплового излучения, контакта с нагретыми поверхностями, тепловых потоков, открытого пламени, механических воздействий, агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий. В зависимости от степени защиты от тепловых воздействий современная ОСЗ ПТВ подразделяется на три типа исполнения:

- тяжёлый (Т);
- полутяжёлый (ПТ);
- лёгкий (Л).

Комплекты одежды *тяжёлого типа* должны позволить быстро и эффективно выполнить работы по открыванию-закрыванию задвижек, разборке строительных конструкций, удалению препятствий внутри воспламенённых зон на предприятиях газонефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, провести первоочередные аварийно-спасательные работы.

Появившись в 1970-х годах, первые теплоотражательные (ТОК) и теплозащитные (ТСК-75) костюмы обладали неудовлетворительным качеством и невысокой эффективностью при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ по причине отсутствия высококачественных материалов, несовершенства конструктивного исполнения спецодежды. Развитие текстильного производства, химической отрасли и дальнейшие исследования учёных позволили значительно улучшить эксплуатационные характеристики применяемых материалов, усовершенствовать конструкцию специальной защитной одежды [2].

Сегодня материалы для ОСЗ ПТВ тяжёлого типа вырабатываются преимущественно на основе стекло-, кремнезёмистой ткани или ткани из арамидных волокон с высоким коэффициентом отражения (ткани «Термит» (Россия), «Alpha-Magitek» (Великобритания)). При этом современные методы получения текстильных материалов с новыми свойствами позволяют образовывать гладкие поверхности с высокой степенью отражения, используя плоские гибкие плёнки с нанесённым металлизированным покрытием различной толщины. Металлизированные материалы на тканой основе обладают рядом преимуществ. Не теряя свойств, присущих текстилю (невысокая жёсткость, хорошая драпируемость, прочностные характеристики), они приобретают свойства, присущие металлам (обладают электрической проводимостью, отражают тепловое (ИК) и электромагнитное (ВЧ, СВЧ) излучение) [3].

В настоящее время соединение деталей специальной защитной одежды пожарных в швейном производстве выполняют ниточным, сварным и комбинированным способами. В зарубежной практике швы ОСЗ ПТВ часто полностью закрывают и запаивают, используя сварные, заклёпочные или комбинирован-

ные соединения. Однако перечисленные методы скрепления имеют ограниченное применение, вызванное в первую очередь термопластичными свойствами материалов.

Преобладание лесных и торфяных пожаров, ликвидация чрезвычайных ситуаций на территориях Беларуси, подвергшихся радиационному загрязнению (последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС) требуют критического подхода при использовании зарубежного опыта и внедрении передовых технологий в существующих условиях.

Учитывая планируемые объёмы выпуска такого рода одежды, частую сменяемость ассортимента спецодежды и материально-техническое оснащение предприятия-изготовителя данной экипировки в Республике Беларусь РПУП «Униформ» (г. Микашевичи Брестской области), наиболее приемлемым способом соединения деталей ОСЗ ПТВ тяжёлого типа является ниточное скрепление. Процесс соединения деталей швейных изделий ниточным способом сравнительно прост, в условиях белорусских швейных предприятий максимально обеспечен технологическим оборудованием, не требует значительных затрат при смене ассортимента. Из всех перечисленных ранее данный способ наиболее универсален, позволяет соединять все виды материалов, используемых в швейной промышленности.

Однако наличие плёночного покрытия, специфические свойства тканой основы диктуют необходимость тщательного исследования технологии сборки деталей ОСЗ ПТВ при использовании такого рода материалов.

Металлизированные материалы на основе стекло-, кремнезёмистой ткани являются дорогостоящими, поэтому ОСЗ ПТВ тяжёлого типа эксплуатируются подразделениями МЧС Республики Беларусь максимально долго до появления дефектов, не подлежащих устранению в условиях пожарной части.

В настоящее время для территории республики разработаны методы оценки физико-механических и теплофизических свойств материалов и пакетов ОСЗ ПТВ различного уровня защиты в процессе эксплуатации, которые реализованы в проекте СТБ «Защитная одежда пожарных. Экспресс-методы оценки». Стандарт позволяет осуществить неразрушающий промежуточный контроль свойств одежды и прогнозировать эффективный срок её эксплуатации. Однако разработка методов оценки качества ниточных соединений деталей ОСЗ ПТВ по-прежнему является актуальной научной и практически значимой задачей.

Ниточное скрепление деталей из металлизированных материалов с плёночным покрытием приводит к перфорации верхнего защитного слоя иглой швейной машины. Образующиеся в процессе стачивания поры вызывают смещение нитей в тканях под воздействием внешних сил. Повышенная раздвигаемость нитей в швах, возникающая из-за недостаточного тангенциального сопротивления взаимному перемещению нитей стекловолокна в ткани (низкого трения между нитями основы и утка), способствует не только прохождению тепла в местах соединения деталей ОСЗ ПТВ, но и его распространению (растеканию) по внутренней поверхности материала с течением времени (рис. 1).

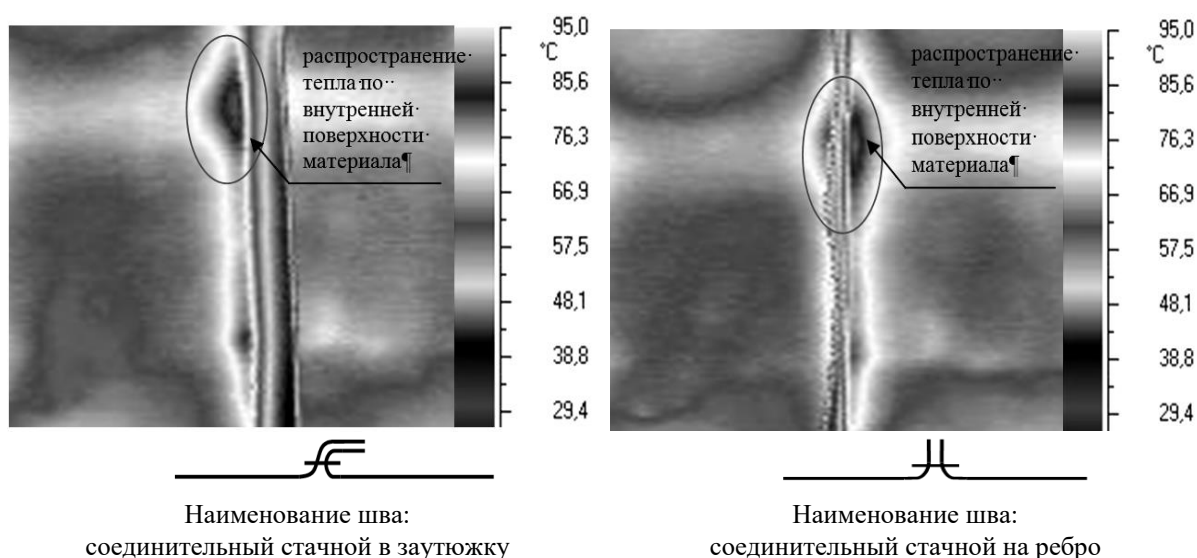


Рис. 1. Термографические снимки внутренней стороны материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в местах соединения деталей (в швах)

Качество узлов и соединений одежды пожарных, характер повреждений оценивается по окончании работ визуальным осмотром ОСЗ ПТВ, поэтому точность и достоверность значений показателей

свойств, определяющих целостность деталей в местах их соединения, зависят от квалификации, практического опыта, способностей специалистов, выполняющих контроль. Несущественное и незаметное при визуальном осмотре повреждение материала верха в околошовной зоне и последующая раздвижка нитей в швах не всегда являются индикатором очевидных повреждений, но могут привести к преждевременному отказу ОСЗ ПТВ во время его эксплуатации, а следовательно, к получению травм при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Поскольку вопросы изменения эксплуатационных показателей узлов и соединений ОСЗ ПТВ тяжелого типа после многоцикловых воздействий открытого пламени, высоких температур, тепловых потоков, промежуточного контроля качества и определения сроков безопасной эксплуатации до настоящего времени остаются актуальными, возникает необходимость всестороннего изучения динамики изменения теплозащитных свойств материала верха в местах соединения деталей ОСЗ ПТВ, т.е. в швах.

Постановка задачи и её решение. Целью данной работы являются теоретические исследования закономерности распределения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжелого типа в радиальном направлении с течением времени.

При решении поставленной задачи огнетермостойкий материал с металлизированным покрытием рассматривается как неограниченная пластина, имеющая толщину δ , теплоизолированная с внутренней стороны за счёт полного теплового контакта между слоями материала. К наружной поверхности равномерно подводится тепловой поток Q . Задача состоит в нахождении при стационарном режиме разности температур между центром и периферией как функции теплового потока.

Согласно закону Фурье [4], тепловой поток, растекающийся по пластине в радиальном направлении, выражается зависимостью:

$$Q = -\lambda \frac{dT_r}{dr} 2\pi r \delta, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м °С; r – текущее значение радиуса, м; δ – толщина пластины, м; T_r – температура в произвольной точке поверхности пластины на расстоянии r от центра.

Текущее значение радиуса определяется условием:

$$0 \leq r \leq R, \quad (2)$$

где R – радиус, при котором T_r равна температуре окружающей среды.

При изменении линейной координаты на величину dr тепловой поток составляет:

$$Q_{r+dr} = -\lambda \frac{dT_{r+dr}}{dr} (r + dr) 2\pi \delta, \quad (3)$$

где $dT_{r+dr} = T_r + \frac{dT_r}{dr} dr$ при нагревании элементарного участка $Q_r > Q_{r+dr}$.

Согласно закону сохранения энергии, скорость изменения количества теплоты в произвольной точке в момент времени t равна разности между входящими в точку и выходящими из нее количествами теплоты, тогда разница между потоками теплоты, полученными по уравнению (1) и (3), составит:

$$dQ = dQ_r - dQ_{r+dr}. \quad (4)$$

С учётом зависимостей (1) и (3) выражение (4) можно записать в виде:

$$dQ = 2\pi\lambda\delta \left(\frac{d^2T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (5)$$

Поскольку по условию задания к наружной поверхности пластины подводится постоянный тепловой поток, удобно воспользоваться граничными условиями второго рода. При этом приращение теплового потока [4] находим из выражения:

$$dQ = q 2\pi r \lambda, \quad (6)$$

где q – плотность теплового потока (Вт/м²).

Подставляя выражение (6) в (5) и решая относительно T_r , получаем дифференциальное уравнение теплопроводности в виде:

$$\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_r}{dr} = \frac{q}{\lambda \delta}. \quad (7)$$

Зависимость (7) выражает процесс распространения теплоты в пластине только теплопроводностью. Однако в реальных условиях необходимо учесть явление конвекции, заключающееся в переносе тепла путем перемещения самих частиц газа. Тепло передается конвекцией от газов к твердым телам, и наоборот. При решении поставленной задачи учитывается естественная конвекция, возникающая в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения.

Результирующее приращение теплового потока dQ_1 при изменении линейной координаты dr складывается из приращений теплоты за счёт теплообмена с окружающей средой dQ_2 при граничных условиях третьего рода и теплопроводностью по пластине dQ_3 :

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3. \quad (8)$$

При использовании граничных условий третьего рода задаются температура окружающей среды и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Тогда приращение dQ_2 в соответствии с законом Ньютона имеет вид:

$$dQ_2 = \alpha(T_0 - T_r)2\pi r dr, \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; T_0 – температура в центре, °С, определяемая экспериментально.

Приращение dQ_2 описывается выражением:

$$dQ_1 = q2\pi r dr. \quad (10)$$

Приращение dQ_3 , как показано в формуле (5), определяется следующим образом:

$$dQ_3 = 2\pi\lambda\delta \left(\frac{d^2 T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (11)$$

Тогда выражение (8) примет вид:

$$q2\pi r dr = \alpha(T_0 - T_r)2\pi r dr + 2\pi\lambda\delta \left(\frac{d^2 T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (12)$$

Разделив правую и левую части уравнения (12) на $2\pi r dr$, получим выражение для расчёта плотности результирующего теплового потока:

$$q = \alpha(T_0 - T_r) + \lambda\delta \left(\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{dT_r}{r dr} \right). \quad (13)$$

Деление правой и левой частей уравнения (13) на произведение $\lambda\delta$ и последующее приравнение к нулю позволяет представить дифференциальное уравнение (13) в виде Бесселевой функции:

$$\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_r}{dr} - \frac{\alpha}{\lambda\delta} T_0 - \frac{\alpha}{\lambda\delta} T_r - \frac{q}{\lambda\delta} = 0. \quad (14)$$

Решение дифференциального уравнения, как показано в [5; 6], имеет вид:

$$T_r = -\frac{\lambda\delta}{\alpha} B_1 J_0 \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda\delta}} r \right) + T_0 - \frac{q}{\alpha}. \quad (15)$$

При $r = R$ $T_r = T_c$.

Соответственно, выражение для нахождения корня B_1 уравнения (15) имеет вид:

$$B_1 = \frac{\alpha}{\lambda \delta} \frac{T_0 - T_c - \frac{q}{\alpha}}{J_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}} R}, \quad (16)$$

где T_c – температура окружающей среды, °С; $T_0 = T_{\max}$ – температура в центре, °С; $J_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}} R$ – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Решение дифференциального уравнения (15) в виде функций Бесселя первого рода возникает часто в задачах, описывающих различные процессы и уравнения в цилиндрической системе координат [7]. Для функции Бесселя $J_0(x)$ составлены подробные таблицы. Эта функция чётная, имеет множество корней, разность между которыми равна π .

Подставив B_1 из (16) в дифференциальное уравнение (15), получим расчётную зависимость:

$$T_r = -\left(T_{\max} - T_c - \frac{q}{\alpha}\right) \sqrt{\frac{r}{R}} + T_{\max} - \frac{q}{\alpha}. \quad (17)$$

Характерная зависимость изменения температуры на внутренней поверхности материала верха в радиальном направлении в области его перфорации иглой швейной машины (в шве) была определена с учётом исходных данных, представленных в таблице. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований, проведённых на базе учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь».

Исходные данные для расчета изменения температуры на внутренней поверхности материала верха в радиальном направлении

Тип исполнения ОСЗ ПТВ	Вид материала верха, волокнистый состав, поверхностная плотность	Значение исходной плотности теплового потока, кВт/м ²	Температура на внутренней поверхности материала верха в области его перфорации иглой швейной машины (в поре), °С	Температура на неповреждённом участке внутренней стороны материала верха, °С
Тяжёлый (Т)	«АльфаМаритекс», стекловолокно, 100 %, 460 г/м ²	40	85,75	62,80

Для определения максимального значения температуры на внутренней поверхности материала верха в области поры (T_{\max}) и на участках неповреждённого материала (T_c) использовалось следующее оборудование:

- установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока (аттестат аккредитации учреждения N ВУ/11202.1.0.0192, срок действия до 17.09.2015);
- приёмник теплового потока ПТПО № 192;
- измеритель-регулятор «Сосна-002»;
- термоэлектрический преобразователь ТХА-1199/53;
- секундомер Интеграл С-014;
- комплекс средств измерений для проведения исследований пакетов материалов по определению устойчивости к воздействию теплового потока с многоканальной регистрацией характеристик.

Схема установки приведена на рисунке 2.

Пробы материала верха размером 210×70 мм с фрагментами соединительного стачного шва в узкую подвергались воздействию теплового потока плотностью 40 кВт/м². В качестве источника излучения использовалась радиационная панель размером 200×150 мм с нагревательным элементом в виде спирали из нихромовой проволоки (согласно ГОСТ 14081). Продолжительность цикла тепловой нагрузки составляла не менее 120 с (согласно СТБ 1972-2009). Для измерения значения температуры на внутренней поверхности материала верха в области его перфорации иглой швейной машины и на неповреждённых участках использовались три термопары, прикреплённые под углом 120° друг к другу на расстоянии

20 ± 2 мм от центра датчика. Одновременно с измерением температуры с помощью датчика типа Гордона (диапазон измерения от 1 до 50 кВт/м², погрешность измерений – не более 8 %) снимались данные плотности теплового потока.

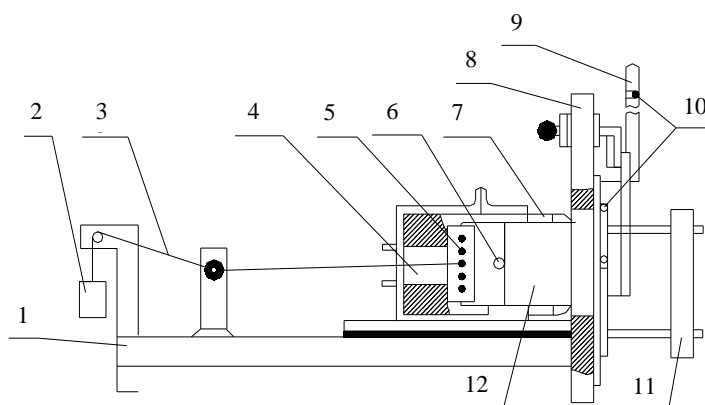


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

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

Так как экспериментальное значение T_{max} , учитывает влияние естественной конвекции, то расчётная формула (17) принимает вид:

$$T_r = T_0 - \sqrt{\frac{r}{R}}(T_0 - T_c), \quad (18)$$

где $T_0 = T_{max} - \frac{q}{\alpha}$.

Для расчёта и построения эпюры, отражающей закономерность изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в радиальном направлении от центра с максимальной температурой, была использована среда математического моделирования Maple 9. Полученная графическая зависимость представлена на рисунке 3.

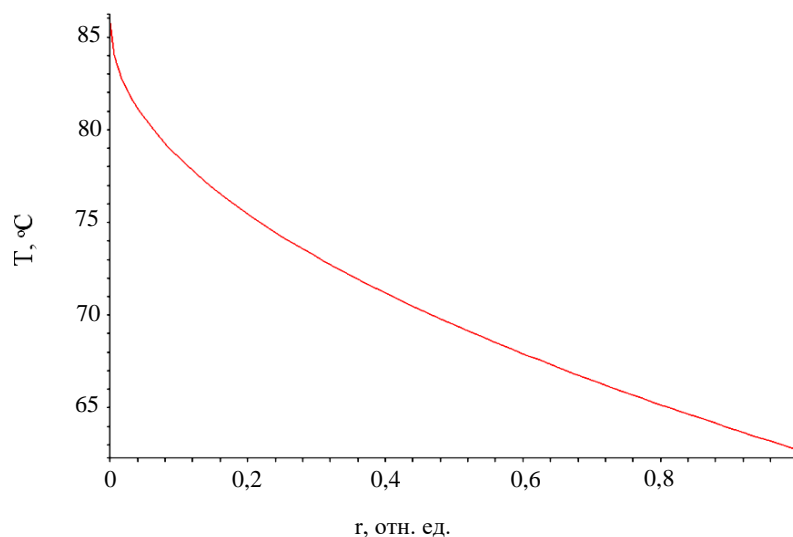


Рис. 3. Эпюра изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в местах его перфорации иглой швейной машины (в околешовной зоне)

При равноценном воздействии раздирающих нагрузок по обе стороны шва эпюра, представленная на рисунке 3, будет симметрична относительно оси ординат, следовательно, область распространения (растекания) тепла по внутренней поверхности материала верха увеличится вдвое.

Заключение. В процессе теоретических исследований получена математическая модель изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ в местах его перфорации иглой швейной машины (в швах) в радиальном направлении. Полученные результаты позволяют, используя современные компьютерные технологии, детально изучить и моделировать динамику изменения температуры на внутренней поверхности материала в околшовной зоне с течением времени при многоцикловых воздействиях раздражающих нагрузок.

Вопросы точного определения сроков эффективной и безопасной эксплуатации ОСЗ ПТВ тяжёлого типа являются актуальными и достаточно сложными, поэтому требуют дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия: СТБ 1972-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Госстандарт. – Витебск: НИЦ ВОУ МЧС, 2010. – 46 с.
2. Результаты исследований по разработке различных видов специальной защитной одежды пожарных // Все о пожарной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.0-1.ru/articles/showdoc.asp?dp=39&chr=2>. – Дата доступа: 21.02.2013.
3. Покрывтия на текстильные и полимерные материалы / Элком. Вакуумно-плазменные технологии [Электронный ресурс]. – Витебск, 2010. – Режим доступа: <http://www.elcom.biz/services/textile-polymer-cover/>. – Дата доступа: 21.02.2013.
4. Теплотехника: учебник для студ. вузов / А.М. Архаров [и др.]; под ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. – М.: Мир, 1974. – 615 с.
6. Карслоу, Г. Теплопроводность твёрдых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
7. Тулайкова, Т.В. Вводный курс по специальным функциям для аспирантов-физиков / Т.В. Тулайкова, С.Р. Амирова. – М.: ЗАО «Книга и бизнес», 2009. – 156 с.

Поступила 04.04.2013

THEORETICAL STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE ON THE INSIDE SURFACE OF THE MATERIAL OF TOP OF PROTECTIVE CLOTHING FOR THE FIREMEN FROM HIGH EFFECTS OF HEAT

V. DOVYDENKOVA, V. OLSHANSKY, N. DMITRAKOVICH, E. MATSKEVICH

Analytical solution of the problem of determination of regularity of temperature change on the inside surface of the material of the top of special protective clothes of firemen of heavy type in the radial direction over time is studied. The fire resistant material with metallized covering is considered as the unlimited plate insulated from the inside due to the complete thermal contact between the layers of material. A formula for the calculation of the temperature difference on the inner surface of the material of the top of special protective clothes of firemen of heavy type in the places of puncture of needle sewing machine, has been obtained (in the seam zone).

УДК 622.232

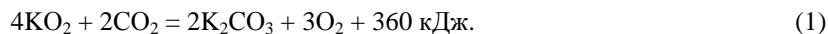
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ

*д-р техн. наук, доц. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ, С.А. ОЛЬШАНИКОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Экспериментально подтвержден новый способ продления защитного действия изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде. В его основе – уменьшение среднего диаметра гранул кислородсодержащего продукта в направлении фильтрации выдыхаемого воздуха, за счет чего в процесс регенерации включен ресурс мертвого слоя сорбента, равномерно распределены источники экзотермического тепла и смягчен температурный режим регенеративного патрона. Сформулирована концепция определения прироста защитного действия аппарата, основанная на интегральных характеристиках – общих количествах проскочивших и хемосорбированных молекул CO₂. В ее рамках критическое значение проскока – функционал его эволюции во времени. Полученные интервальные оценки дополнительного использования ресурса патрона позволяют обойтись без многочисленных и дорогостоящих натурных экспериментов.

Регенеративные патроны дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде снаряжены пористыми гранулами на основе супероксидов щелочных металлов (рис. 1). В процессе фильтрации выдыхаемого воздуха через слой таких гранул они поглощают CO₂ и выделяют необходимый для вдоха кислород. Требования физиологии накладывают ряд ограничений на процентный состав регенерируемой в аппарате атмосферы [1 – 3]. Человек при нормальных условиях вдыхает воздух с содержанием 21 % O₂ и 0,03 % CO₂, а выдыхает с содержанием 15,7 % O₂ и 3,8 % CO₂. Таким образом, выдыхаемый воздух содержит кислорода меньше на 5,3 %, а углекислого газа на 3,77 % больше.

Поскольку дыхательный аппарат должен обеспечивать восстановление кислорода примерно в 1,5 раза больше поглощения углекислого газа, то основная химическая реакция, происходящая в регенеративном патроне, должна соответствовать такой пропорции. По этой и другим причинам в отечественных аппаратах наибольшее распространение получил калиевый продукт:



Химический способ резервирования кислорода обладает рядом преимуществ. Твердые вещества в тысячу раз плотнее газов. А стальные баллоны выдерживают лишь 200...250 атмосфер. То есть плотность «упаковки» кислорода в регенеративном патроне в разы выше, чем в газовом баллоне. При этом баллон весит в шесть раз больше своего содержимого, а коробка регенеративного патрона выполнена из жести (рис. 1) и на порядок легче. Кроме того, в баллонном аппарате необходимо оборудование, снижающее давление кислорода и регулирующее его подачу в зависимости от физической нагрузки человека, а также отдельный поглотитель углекислого газа. Все это усложняет конструкцию баллонного аппарата, увеличивает его массу, габариты и снижает надежность.



Рис. 1. Непрореагировавший кислородсодержащий продукт

Сказанное позволяет главные перспективы развития индивидуальных средств защиты дыхания связать с химическим способом резервирования кислорода. Однако согласно оценкам, приведенным в [4], в существующих респираторах возможности химически связанного кислорода реализованы далеко не полно. К концу гарантированного срока защитного действия используется не более 50 % ресурса регенеративного патрона. В аппаратах с меньшим сроком защитного действия этот показатель еще хуже.

Чтобы существенно повысить эффективность использования химически связанного кислорода, необходимо задействовать ресурс мертвого слоя сорбента (до 13 % защитного ресурса) и оптимизировать температурный режим регенеративного патрона. Выделяющееся в процессе реакции экзотермическое тепло (1) приводит к перегреву и последовательному спеканию слоев кислородсодержащего продукта. Расколов образовавшиеся конгломераты (рис. 2), можно обнаружить непрореагировавшие желтые гранулы, отличающиеся от голубых, расположенных на поверхности и вступивших в реакцию. Таким образом, теряется около 37 % защитного ресурса патрона [4]. Изложенное особенно актуально для небольших аппаратов (самоспасателей), применяемых шахтерами для выхода на свежую струю. В них велика плотность источников экзотермического тепла и доля мертвого слоя в общем количестве сорбента.

Имеются изобретения [5; 6], в которых поставленные задачи решаются за счет изменений в конструкции дыхательных аппаратов. Однако согласно [7] тех же целей можно достичь, варьируя размер гранул в направлении фильтрации воздуха. Лимитирующей стадией процесса хемосорбции является диффузия молекул CO_2 внутрь гранул продукта. Ее скорость обратно пропорциональна квадрату их диаметра [8]. Следовательно, увеличивая гранулы в лобовых слоях продукта и уменьшая в замыкающих, можно смягчить тепловой режим передних, наиболее нагруженных слоев сорбента и уменьшить ширину его мертвого слоя, сосредоточенного в основном в конце патрона.



Рис. 2. Конгломераты спекшихся гранул кислородсодержащего продукта

По техническим причинам плавно менять размер гранул невозможно. В связи с чем патрон следует разделить на две части по ходу течения воздуха, и на границе раздела скачком уменьшить диаметр гранул. Производимый и традиционно используемый продукт состоит из гранул неправильной формы диаметром от 2,5 до 5,5 мм.

Экспериментально установленный гранулометрический состав продукта таков: 34 % массовая доля гранул с диаметром более 5 мм; 30 % доля гранул с диаметром менее 3 мм; 36 % массовая доля гранул с диаметром

около 4 мм. Для такого состава средневзвешенный размер гранул равен $0,34 \cdot 5 + 0,36 \cdot 4 + 0,3 \cdot 3 \approx 4$ мм. Поэтому для сопоставительного эксперимента один патрон снарядили однородно 4-миллиметровыми гранулами, второй – со скачком гранулометрического состава, для чего использовали гранулы со средним диаметром 5 и 3 мм соответственно по ходу движения воздуха.

Место скачка диаметра обосновано с помощью описанных в [7] численных экспериментов. Очевидно, во вторую часть патрона поступает переменная концентрация CO_2 , монотонно возрастающая по мере исчерпания ресурса первой. Поэтому в основу расчетов были положены результаты работы [9], в которой рассматривались переменные краевые условия в задаче динамики сорбции. Согласно [9] при постановке натуральных экспериментов долю первой части патрона целесообразно варьировать в пределах от 24,7 до 37,7 % всего патрона. Нижняя граница интервала получена из условия одинаковой мощности источников экзотермического тепла в начале первой и второй частей патрона. Верхняя – из условия сохранения теоретического (без учета спекания) срока защитного действия аппарата, что позволяет максимально смягчить температурный режим лобовых слоев продукта.

Испытания проводились в отделе средств защиты дыхания НИИГД на стенде-имитаторе дыхания, описанном в ГОСТе [10]. Общий вид стенда приведен на рисунке 3, а его схема – на рисунке 4.



Рис. 3. Общий вид стенда-имитатора дыхания

В экспериментах использовался патрон с габаритами $80 \times 55 \times 160$ мм, изготовленный для самоспасателя, совмещенного с аккумуляторной батареей от индивидуального осветительного прибора. Фильтрация воздуха осуществлялась вдоль длины $L = 80$ мм.

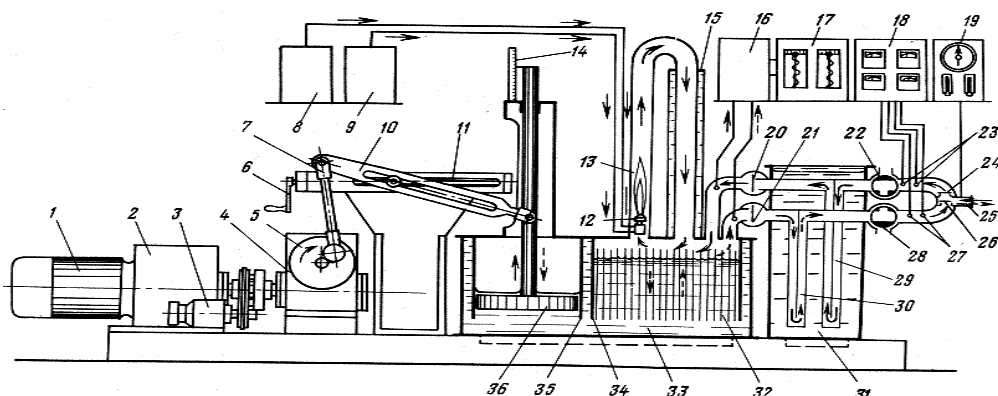


Рис. 4. Схема стэнда-имитатора дыхания:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта скольжения; 3 – регулятор частоты вращения; 4 – редуктор; 5 – кривошип;
 6 – регулятор объема дыхания; 7 – шатун; 8, 9 – дозаторы кислорода и метилового спирта;
 10 – коромысло; 11 – винт регулятора объема дыхания; 12 – горелка; 13 – камера сгорания;
 14 – шкала регулятора объема дыхания; 15 – холодильник; 16 – пробоотборник; 17 – газоанализатор;
 18 – электротермометры; 19 – мановакуумметр для определения сопротивления дыханию;
 20, 21 – первые клапаны вдоха и выдоха; 22 – двухходовый кран вдоха; 23 – сухие и влажные датчики определения влажности вдыхаемого воздуха; 24 – клапан вдоха; 25 – присоединительный штуцер; 26 – клапан выдоха;
 27 – сухие и влажные датчики определения влажности выдыхаемого воздуха; 28 – двухходовый кран выдоха;
 29, 30 – теплообменник; 31 – термостат; 32 – металлические пластины насадки; 33 – термостатическая ванна;
 34 – камера газообмена; 35 – цилиндр искусственных легких; 36 – поршень

Поскольку спекание продукта – главная причина неэффективного использования ресурса патрона, его температурный режим целесообразно смягчить по возможности максимально. Для этого координату скачка диаметра необходимо приблизить к правой границе оговоренного интервала. Заметим в этой связи, что теплораспределитель представлял собой набор из трех установленных друг за другом (в направлении фильтрации) пластинчатых элементов (рис. 5, 6), естественным образом разделяющих объем патрона на три равные части.



Рис. 5. Расположение элемента теплораспределителя в патроне

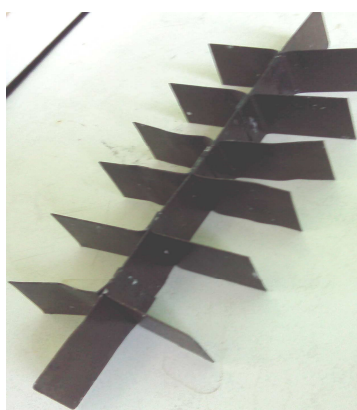


Рис. 6. Элемент теплораспределителя

Поскольку 33 % в первом приближении примерно равно 38 %, крупными гранулами была заполнена первая треть патрона, отделенная от второй части металлической сеткой (рис. 7). Если пренебречь пристеночными эффектами, плотность упаковки одинаковых гранул не зависит от их размера [11], поэтому массы однородно и неоднородно снаряженных патронов оказались одинаковыми. Для первого опыта использовано 450 г средних гранул, а для второго – 150 г крупных и 300 г мелких. Разделение гранул на фракции осуществлено с помощью комплекта сит (рис. 8). Была реализована открытая схема работы аппаратов, при которой проскок CO_2 не добавляется к воздушной смеси, поступающей на вход регенеративного патрона, поскольку этот эффект не учитывался при постановке численных экспериментов. Чтобы усредненно адекватно приблизить опыт к реальным условиям внутри работающего аппарата, концентрация CO_2 на выдохе увеличена против обычной на 0,5 %.

Воздух подавался импульсно (20 вдохов/выдохов в минуту), объем одного вдоха 1 л. Имитировался промежуточный (между 2 и 5-м) режим тяжести физической нагрузки. На вход патрона поступало 0,9 л углекислоты в минуту при легочной вентиляции 20 л/мин, что соответствует 4,5 % содержанию CO_2 в выдыхаемом человеком воздухе. Его температура поддерживалась равной $37 \pm 0,5$ °С, относительная влажность 96 ± 2 %. Атмосферное давление в момент испытаний равнялось 740 мм рт. ст.

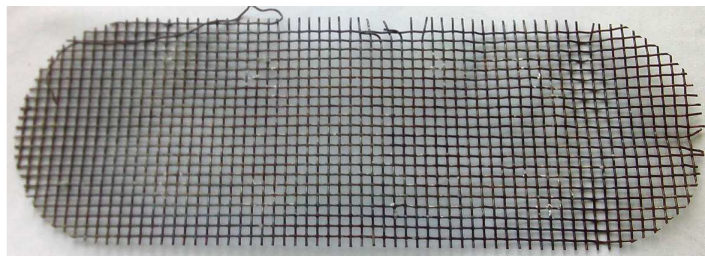


Рис. 7. Сетка, разделяющая патрон на отсеки с крупными и мелкими гранулами кислородсодержащего продукта

Содержание CO_2 как функция времени отслеживалось на выходе из патрона с помощью газового анализатора ГИАМ-5. Температура на корпусе патрона измерялась с помощью электронного термометра с длинным щупом (рис. 9). Показания снимались в пяти точках: в начале и середине первой (снаряженной крупными гранулами) части патрона, а также в начале, середине и конце второй части патрона. Вследствие инерции прибора на одно измерение уходило порядка десяти – пятнадцати секунд. Это позволяло повторять цикл каждые пять минут, не вступая в противоречие с моделью регенерации [9], трактуемой процесс как квазистационарный. Результаты измерений температуры как функции времени и координаты в опытах с однородным гранулометрическим составом и при наличии скачка диаметра представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.



Рис. 8. Сита для отсева гранул на фракции



Рис. 9. Измерение температуры работающего патрона

Таблица 1

Температура (°С) на стенке патрона с гранулами 4 мм

Координата, см \ Время, мин	0	1	2	4	6
5	69	70	63	47	39
10	88	91	92	85	59
15	93	104	108	108	92
20	96	108	115	120	117
25	93	103	119	132	131
30	92	102	114	120	116
35	87	96	109	119	117
40	80	91	100	106	104

Таблица 2

Температура (°C) на стенке патрона с гранулами 5 и 3 мм

Координата, см \ Время, мин	0	1	2	4	6
5	66	67	65	52	37
10	74	80	81	71	60
15	89	95	100	98	85
20	91	103	111	119	117
25	90	99	110	130	130
30	87	96	105	117	117
35	84	92	104	114	115
40	79	85	94	116	116

Заметим, что толщина поглощающего слоя в обоих опытах на 20 мм меньше длины патрона, так как 1 см в начале и конце патрона занимает подпружиненная перфорированная перегородка с металлической сеткой (рис. 10), уплотняющая кислородсодержащий продукт для предотвращения образования пристеночных пустот.

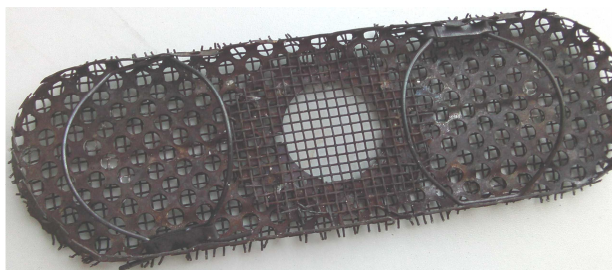
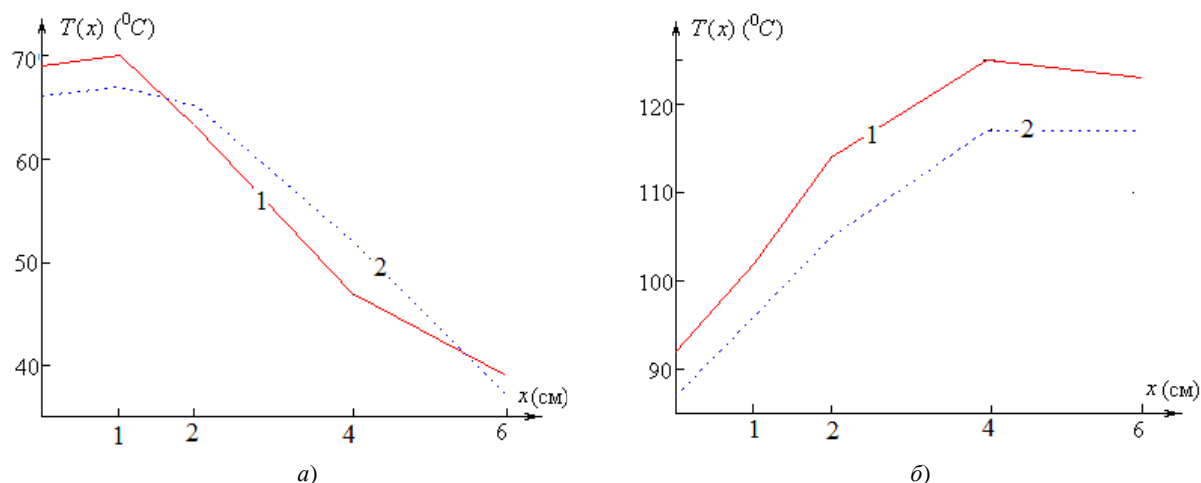


Рис. 10. Подпружиненная уплотняющая перегородка

Зависимость температуры корпуса патрона от координаты, построенная на основе табличных данных для различных опытов в одинаковые моменты времени, представлена в графической форме на рисунках 11, а и 11, б.



Зависимость температуры корпуса патрона от координаты:
 а – температура патрона на 5-й минуте работы; б – температура патрона на 30-й минуте работы;
 1 – одинаковые гранулы; 2 – со скачком диаметра

Видно, что наличие скачка гранулометрического состава привело к более равномерному распределению температуры (рис. 11, а) по слоям продукта, что является следствием более равномерного распределения в патроне связанного углерода, а значит, и источников экзотермического тепла. Это увеличивает поверхность теплопередачи и интенсивность ее процесса. По этой причине при более поздних временах средняя по координате температура корпуса неоднородно снаряженного патрона оказывается ниже (рис. 11, б), чем в патроне с одинаковым гранулометрическим составом. И это несмотря на большее

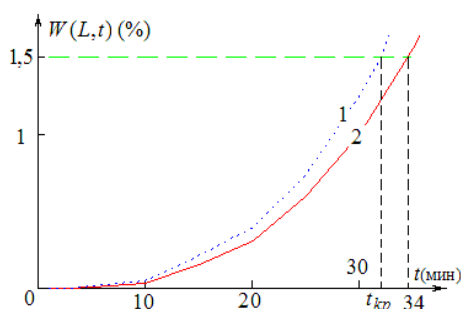


Рис. 12. Проскок CO_2 через регенеративный патрон: 1 – с однородным гранулометрическим составом; 2 – при наличии скачка диаметра гранул



Рис. 13. Отработанные гранулы в случае неоднородно снаряженного патрона

Фрагмент одной из них в среде пакета MathCAD приведен на рисунке 14. Входом в программу является обезразмеренная длина патрона η , место скачка диаметра ζ и его величина, характеризуемая параметрами $\alpha = (4/5)^2$ и $\beta = (4/3)^2$. С помощью имеющейся в [12] таблицы для данного количества продукта (450 г) и реализованного в опыте объемного расхода воздуха 20 л/мин получим $\eta = 450 \cdot 30 \cdot 6 / 915 \cdot 20 = 4,426$. Здесь 6 – обезразмеренная длина 915-граммового патрона в 5-м режиме эксплуатации, которому отвечает объемный расход воздуха 30 л/мин. Соответственно $\zeta = 1,475$ как отделяющая третью часть патрона. Выполненные с такими входными параметрами расчеты дают 4,1 % прирост теоретического срока защитного действия. Следовательно, примерно треть прироста (6 % – 4,1 % = 1,9 %) связана с более мягким температурным режимом патрона. В пользу этого говорит и то обстоятельство, что согласно экспериментальным данным в начале работы патрона температуры на входе в первую и во вторую части патрона ($x = 2$) примерно равны и заметно ниже, чем на входе однородно снаряженного патрона (см. рис. 11, а). Из последнего графика программы (рис. 14) видно, что наклоны кривых роста загрязненности (скорости поглощения CO_2) в начале первой и второй части патрона примерно равны и ниже соответствующего показателя на входе в неразрезанный патрон.

Следует заметить, что критическое значение проскока CO_2 является в значительной мере условным показателем, означающим, что снижение работоспособности, начинающееся при значительно меньших концентрациях CO_2 , поступающих на вдох, постепенно накапливаясь, сводит на нет защитные функции аппарата примерно к моменту критического проскока $t_{кр}$. Очевидно, однако, что работоспособность иссякнет гораздо раньше, если в течение всего этого времени подавать на вдох чуть менее 1,5 % CO_2 . И наоборот, если почти до самого конца проскок практически отсутствовал, человек какое-то время будет выдерживать на вдохе сверхкритические концентрации углекислого газа. То есть само критическое значение проскока увеличится. Иными словами, оно является функцией (правильнее функционалом) способа его достижения. По этой причине прирост защитного действия корректнее оценивать интегрально.

Например, количеством связанных

$$\int_0^{\eta} u(\xi, \tau_1(\eta)) d\xi \Big/ \int_0^{\eta} u_3(\xi, \tau(\eta)) d\xi,$$

или проскочивших молекул CO_2 ,

$$\int_0^{\tau(\eta)} \omega_3(\eta, \tau) d\tau = \int_0^{\Delta} \omega(\eta, \tau) d\tau,$$

где u и u_3 – приведенные концентрации связанного, ω и ω_3 – проскочившего углерода соответственно при наличии и без скачка диаметра гранул; τ , ξ и η – обезразмеренные время, координата и длина патрона; $\tau(\eta)$ и $\tau_1(\eta)$ – время наступления критического проскока CO_2 в однородном патроне и при наличии скачка

количество поглощенных молекул CO_2 , так как их проскок в рассматриваемый момент времени на 20 % меньше (рис. 12). Представленные на нем зависимости построены на основе данных, полученных в ходе эксперимента.

Следует подчеркнуть, что температура внутри патрона в несколько раз выше, чем на его корпусе. Соответственно, значительнее и отличие температур продукта в первом и втором опытах. Это позволило предотвратить спекание гранул (рис. 13) и дополнительно отсрочить время (см. рис. 12) наступления критического проскока CO_2 . Физиология человека такова, что отравление углекислым газом начинается после полутора процентов его содержания на вдохе, что произошло на 34 минуте. В итоге общий прирост срока защитного действия оказался равен 6 %.

Напомним, что в рассматриваемом опыте доля первой части патрона (33 %) заметно меньше своего максимального значения (38 %), полученного из условия неумножения теоретического срока защитного действия [7]. Это значит, что часть прироста $t_{кр}$ обеспечена увеличением динамической сорбционной активности за счет ресурса мертвого слоя сорбента.

Чтобы оценить вклад в 6 %-ный прирост предотвращенного спекания продукта, определим, какая часть из этих 6 % достигнута за счет ресурса мертвого слоя сорбента. Для этого воспользуемся развитым в [7; 9] формализмом и написанным на его основе комплектом программ.

$$\zeta := 1.5 \quad \eta := 4.5 \quad N_{\text{max}} := 30 \quad \alpha := \frac{16}{25} \quad \beta := \frac{16}{9} \quad \frac{\zeta}{\eta} = 0.333$$

$$\omega 1(\xi, \tau) := e^{-\alpha \cdot \xi} \left[1 + \sum_{n=1}^N \left[\frac{(\alpha \cdot \xi)^n}{n!} \left[1 - e^{-\alpha \cdot \tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha \cdot \tau)^k}{k!} \right] \right] \right]$$

$$\omega 3(\xi, \tau) := e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^N \left[\frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right] \right]$$

$$u 1(\xi, \tau) := 1 - e^{-\alpha \cdot \tau} \left[1 + e^{-\alpha \cdot \xi} \sum_{n=1}^N \left[\frac{(\alpha \cdot \xi)^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{(\alpha \cdot \tau)^k}{k!} \right] \right]$$

$$f 0(\tau) := \omega 1(\zeta, \tau) \cdot e^{-\beta \cdot \tau} \quad N 1 := 80 \quad k := 0..N 1 \quad x_k := 0.05 \cdot k$$

$$y 1_k := \beta \cdot \int_0^{x_k} f 0(\tau) \, d\tau \quad S 1 := \text{cspline}(x, y 1) \quad f 1(\tau) := \text{interp}(S 1, x, y 1, \tau)$$

$$y 2_k := \beta \cdot \int_0^{x_k} f 1(\tau) \, d\tau \quad S 2 := \text{cspline}(x, y 2) \quad f 2(\tau) := \text{interp}(S 2, x, y 2, \tau)$$

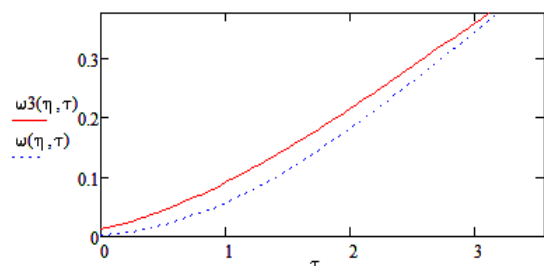
.....

$$y 35_k := \beta \cdot \int_0^{x_k} f 34(\tau) \, d\tau \quad S 35 := \text{cspline}(x, y 35) \quad f 35(\tau) := \text{interp}(S 35, x, y 35, \tau)$$

$$\omega 5(\xi, \tau) := e^{-\beta \cdot (\xi + \tau)} \left[f 0(\tau) + f 1(\tau) \cdot \beta \cdot \xi + f 2(\tau) \cdot \frac{(\beta \cdot \xi)^2}{2!} + \dots + f 35(\tau) \cdot \frac{(\beta \cdot \xi)^{35}}{35!} \right]$$

$$\omega(\xi, \tau) := \omega 1(\xi, \tau) \cdot \Phi(\zeta - \xi + 0.001) + \omega 5(\xi - \zeta, \tau) \cdot \Phi(\xi - \zeta - 0.001)$$

$$\tau := 0, 0.05 \cdot \eta + 1$$



$$\tau := \eta \quad \tau(\eta) := \text{root}(\omega 3(\eta, \tau) - 0.375, \tau) \quad \tau(\eta) = 3.111 \quad \frac{\tau 1(\eta) - \tau(\eta)}{\tau(\eta)} = 0.025$$

$$t := \eta \quad \tau 1(\eta) := \text{root}(\omega(\eta, t) - 0.375, t) \quad \tau 1(\eta) = 3.19$$

$$u 2(\xi, \tau) := e^{-\beta \cdot \tau} \cdot \beta \cdot \int_0^{\tau} e^{\beta \cdot t} \cdot \omega 5(\xi, t) \, dt \quad u 3(\xi, \tau) := e^{-\tau} \cdot \int_0^{\tau} e^t \cdot \omega 3(\xi, t) \, dt$$

$$u(\xi, \tau) := u 1(\xi, \tau) \cdot \Phi(\zeta - \xi + 0.001) + u 2(\xi - \zeta, \tau) \cdot \Phi(\xi - \zeta - 0.001)$$

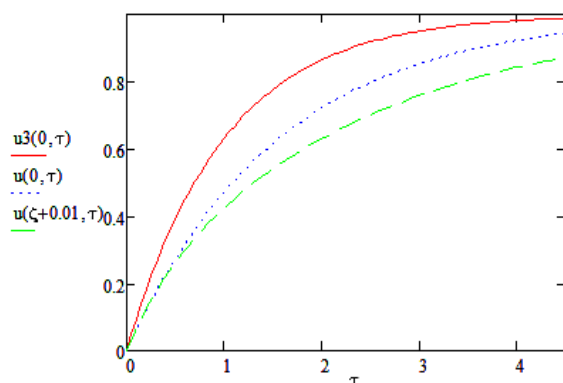


Рис. 14. Программа расчета проскока CO₂ и загрязненности регенеративного патрона

диаметра гранул; Δ – новое время суммарного проскока прежнего количества углекислого газа, проиллюстрированное на рисунке 15, из которого видно, что само критическое значение приведенного проскока возросло от 0,333 до 0,354.

С помощью упомянутых программ (см. рис. 14) получено, что Δ/τ(η) = 1,086. В действительности прирост должен оказаться еще выше, так как за большее время Δ организм может вывести не то же, а несколько большее количество CO₂.

Поскольку Δ > τ(η), патрон успеет поглотить дополнительное количество молекул CO₂

$$\int_0^{\eta} u(\xi, \Delta) \, d\xi / \int_0^{\eta} u 3(\xi, \tau(\eta)) \, d\xi = 1,101,$$

$$\int_0^{\eta} u(\xi, \tau 1(\eta)) \, d\xi / \int_0^{\eta} u 3(\xi, \tau(\eta)) \, d\xi = 1,067$$

В итоге для данных η, ζ, α и β прирост эффективности использования защитного ресурса патрона составит от 6,7 до 10,1 %. При эксплуатации в том же режиме (20 литров воздуха в минуту, содержание CO₂ на входе в патрон 4,5 %) из условия равных пиков «загрязненности» продукта в начале первой и второй части патрона (подробнее см. [7]) получим минимальную долю первой части патрона 20,6 %. Ей отвечает ζ = 0,91 и 9,2 % прирост теоретического срока наступления 1,5 % проскока CO₂. Возрастание данного показателя с 4,1 до 9,2 % объясняется увеличением доли динамически более активной второй части патрона и происходит за счет ресурса мертвого слоя сорбента. При этом полученная на основе интегральных критериев интервальная оценка прироста эффективности дает от 12,9 до 16,7 % дополнительного использования ресурса патрона.

Если перейти от промежуточного к 5-му режиму эксплуатации (объемный расход воздуха 30 л/мин) при той же координате скачка и его величине, получим: η = 2,951, τ 1(η)/τ(η) = 1,10, Δ/τ(η) = 1,144 и от 14,2 до 17,8 % дополнительного использования ресурса патрона. Кроме того, остается эффект смягчения температурного режима, так как чуть более высокий второй пик в рассматриваемом случае остается существенно (на 8,4 %) ниже, чем в начале однородно снаряженного патрона. Значит, к упомянутым процентам в тяжелом температурном режиме в соответствии с ранее

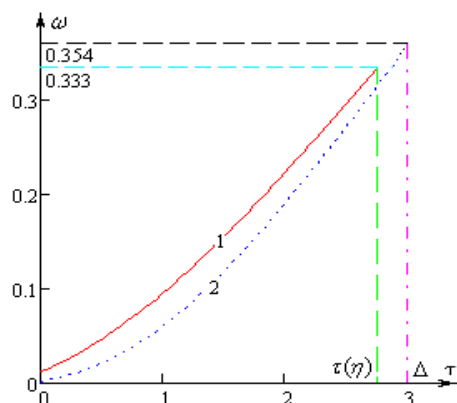


Рис. 15. Эволюция проскока CO_2 и время накопления его допустимой дозы:
1 – однородный состав гранул;
2 – при наличии скачка их диаметра

изложенным добавится еще примерно треть, обусловленная меньшим спеканием продукта в неоднородно снаряженном патроне. В итоге суммарный прирост защитного действия, обусловленный неоднородностью гранулометрического состава, должен находиться в пределах от 19 до 25 %.

Заключение. Полученные оценки позволяют обойтись без многочисленных и дорогостоящих серий экспериментов на людях. В этих сериях реальный прирост защитного действия определяется на основе системы специальных тестов, дозирующих физическую нагрузку человека и варьирующих ее виды. Тем не менее получаемые таким образом результаты весьма субъективны, ибо непонятно, как учитывать физиологические особенности, психологическое и функциональное состояние включенных в аппарат, их волевые качества, мотивированность на выполнение задания и способность преодолеть стресс и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандис, С.А. Очерки по физиологии и гигиене труда горноспасателей / С.А. Брандис. – М.: Медицина, 1970. – 232 с.
2. Леман, Г. Практическая физиология труда / Г. Леман. – М.: Медицина, 1967. – 335 с.
3. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты: утв. Минздравом СССР 23.06.80. – М.: Медицина, 1981. – 27 с.
4. Ехилевский, С.Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Ехилевский. – Днепропетровск, 2002. – 36 с.
5. Изолирующий дыхательный аппарат: пат. 23426 Украина, А 62 В 7/08. / С.Г. Ехилевский, В.В. Пак, Э.Г. Ильинский (Украина). – № 96072701; заявл. 08.07.96; опубл. 08.07.98 // Бюл. № 4. – С. 3.
6. Регенеративный патрон дыхательного аппарата с химически связанным кислородом: пат. 23427 Украина, А 62 В 19/00 / С.Г. Ехилевский, В.В. Пак, Э.Г. Ильинский (Украина). – № 96072700; заявл. 08.07.96; опубл. 08.07.98 // Бюл. № 4. – С. 3.
7. Ехилевский, С.Г. Оптимизация теплового режима шахтного самоспасателя на химически связанном кислороде / С.Г. Ехилевский, С.А. Ольшанников // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6.
8. Влияние формы и размеров пористой гранулы на скорость внутренней диффузии / С.Г. Ехилевский [и др.] // Изв. Донецк. горного ин-та. – 2010. – № 1. – С. 105 – 113.
9. Ехилевский, С.Г. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO_2 в регенеративном патроне шахтного респиратора / С.Г. Ехилевский, С.А. Ольшанников, Е.П. Потапенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 3. – С. 46 – 53.
10. Респираторы изолирующие регенеративные для горноспасательных работ: ОСТ 12.43.247-83.
11. Дубинин, М.М. Физико-химические основы сорбционной техники / М.М. Дубинин. – М.-Л.: Гос. хим.-техн. изд-во, 1932. – 381 с.
12. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В.В. Пак [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. – 1998. – № 11 – 12. – С. 108 – 112.

Поступила 20.06.2013

INCREASE OF EFFECTIVENESS OF BREATHING APPARATUS FOR CHEMICAL OXYGEN

S. EKHILEVSKY, S. OLSHANNIKOV

Experimental evidence is a new way to extend the protective effect of a self contained breathing apparatus for chemical oxygen. It is based on reduction of the average granule diameter of the oxygen product in the direction of filtering exhaled air. In this regeneration process in the resource of dead layer of sorbent is included, sources of exotherm heat are uniformly distributed and the temperature mode of regenerative chuck is softened. The concept of determining the growth of the protective action unit, based on the integral characteristics – total numbers of slipped and chemisorbed CO_2 molecules is formulated. The resulting interval estimates of additional resource use of cartridges eliminate the need of numerous and expensive experiments on humans.

УДК 614.7:313.13(476)

**ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА
ГОРОДОВ НОВОПОЛОЦКА И ПОЛОЦКА В ДИНАМИКЕ ЗА 1980 – 2000 ГОДЫ**

*д-р мед. наук, доц. П.А. ЧЕБОТАРЕВ
(Полоцкий государственный университет)*

Демонстрируется качественная и количественная характеристика степени загрязнения атмосферного воздуха и ее сравнительная оценка в городах Новополоцке и Полоцке за 20 лет. При этом установлена четко выраженная тенденция снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха. Однако наблюдается несоответствие между уровнем снижения величин валовых выбросов и показателей, характеризующих степень загрязнения воздушного бассейна, которые снизились в меньшей степени. Уровень загрязнения атмосферного воздуха по большинству изученных показателей выше в городе Новополоцке.

Введение. Анализ литературных источников показал, что накоплен значительный материал о негативном влиянии предприятий нефтехимического комплекса на окружающую среду и состояние здоровья населения [1 – 3]. Однако разнообразие технологических процессов, отличия в исходном сырье и получаемых продуктах требуют проведения региональных исследований.

Результаты ранее проведенных нами исследований свидетельствуют об интенсивном неблагоприятном воздействии промышленных выбросов предприятий Новополоцкого промышленного узла на состояние окружающей среды и здоровья населения города Новополоцка, расположенного на расстоянии 4,5 км от промышленной зоны [4]. По уровню загрязнения атмосферного воздуха Новополоцк занимает одно из первых мест в Республике Беларусь. На расстоянии 10 км от Новополоцкого промышленного узла находится крупный город Полоцк. В состав Новополоцкого промышленно-энергетического узла входят предприятия нефтеперерабатывающей, химической, микробиологической промышленности и теплоэнергетического комплекса. Все они относятся к категории экологически опасных производств. Основное количество контаминантов направляется в атмосферу с ОАО «Нафтан» – 56,6 % общего валового выброса, Новополоцкой ТЭЦ – 32,2 %, завода «Полимир» ОАО «Нафтан» – 8,4 %, а также ОАО «Стекловолокно» в Полоцке. Загрязнение воздушного бассейна города вредными веществами распределяется равномерно по всей селитебной территории города и соответствует сильной степени. Одновременно в атмосферном воздухе может содержаться до 120 вредных веществ, при этом 16 из них обнаруживались в концентрациях, превышающих ПДК. Кратности превышения колеблются от 1,5 до 53 раз.

С гигиенических позиций Новополоцкая промышленная зона расположена крайне неблагоприятно по отношению к селитебной зоне городов Полоцка и Новополоцка, которые размещаются с подветренной стороны относительно ветров преобладающих направлений, поэтому около половины года ветры со стороны промышленных предприятий направляются на жилые массивы этих городов.

В воздушном бассейне города Полоцка при направлении ветра со стороны Новополоцка определялись вещества, не содержащиеся в выбросах промышленных предприятий Полоцка, – метилметакрилат, нитрил акриловой кислоты, а содержание бензола и толуола было выше, чем при других направлениях ветра.

В силу сложившихся экономических условий в последние 10...12 лет произошло уменьшение объемов производства на промышленных предприятиях городов Новополоцка и Полоцка и, как следствие, сокращение валовых выбросов загрязняющих веществ промышленных предприятий в атмосферный воздух. Следовательно, должен измениться и уровень загрязнения атмосферного воздуха.

Цель настоящего исследования – установление взаимосвязи между величинами валового выброса вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух городов Новополоцка и Полоцка, и степенью его загрязнения.

Объем и методы исследования. С целью определения величин валовых выбросов вредных веществ в атмосферный воздух изучаемых городов была проведена выкопировка данных официальной статистики из формы 2 ТП. Воздух в динамике за 1985...2000 годы.

Для установления степени загрязнения атмосферного воздуха городов Полоцка и Новополоцка вредными веществами была проведена выборка данных комплексной экологической лаборатории Новополоцк Витебскоблгидромета по контролю за содержанием контаминантов в воздушных бассейнах рассматриваемых городов в динамике за 15 лет. За исследуемый период проведена выкопировка сведений из результатов анализов около 500000 проб воздуха. Полученные данные введены в компьютер, созданы базы данных загрязнения атмосферного воздуха изучаемых городов и разработаны компьютерные программы для аналитической обработки результатов.

Результаты исследований. Проведенный нами анализ величин валовых выбросов вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух с выбросами промышленных предприятий в изучаемых городах, показал, что ведущими среди них являются взвешенные вещества, азота оксиды, серы диоксид, углерод оксид и углеводороды (табл. 1). На их долю приходится от 96 до 98 % от суммы общего валового выброса. Следует отметить, что величина валового выброса в городе Новополоцке на порядок выше, чем в Полоцке, и достигала значительных величин – 188699,1 тонн в год (1986 г.). Максимальное значение валового выброса за изучаемый период в Полоцке не превышало 15999,4 тонны в год. По некоторым ингредиентам различие валовых выбросов в изучаемых городах достигает значительных величин – от 134,5 раза у серы диоксида до 175,6 раз у углеводородов.

Таблица 1

Величины валовых выбросов ведущих веществ, загрязняющих атмосферный воздух городов Новополоцка и Полоцка, в динамике за 1986 – 2000 годы (тонн/год)

Годы	Всего	Взвешенные вещества	Оксид углерода	Серы двуокись	Оксиды азота	Углеводороды
<i>Новополоцк</i>						
1986	188699,1	1502,8	5364,4	87301,0	12269,1	72492,7
1987	183678,3	1765,4	5621,4	89061,2	13061,2	71989,4
1988	168444,8	1317,8	5619,1	78525,1	9942,0	70997,7
1989	155497,2	1138,7	5824,4	69807,5	9569,1	67131,6
1990	152909,0	1184,6	5864,9	70026,1	10432,5	61080,3
1991	161226,0	1100,8	5099,2	80029,5	10047,1	61636,5
1992	123478,5	907,4	4322,7	56444,2	7621,9	52064,6
1993	107616,3	931,9	2862,0	47909,2	8203,1	43973,5
1994	90263,6	656,7	2272,7	45463,8	6314,9	3404,8
1995	81818,9	561,2	2794,2	34451,5	5955,8	36971,2
1996	61915,8	217,7	1914,0	23830,5	5168,3	29661,7
1997	55526,9	158,6	2330,6	18667,3	4385,7	28958,6
1998	47340,3	189,9	2208,5	12052,1	3475,2	28785,1
1999	39054,4	343,9	1807,1	10005,2	3689,6	25235,4
2000	51985,0	385,4	2671,6	15547,3	3836,4	31448,7
<i>Полоцк</i>						
1986	15999,4	1879,7	5798,5	5365,5	336,5	807,295
1987	15449,8	3690,6	4409,5	6109,6	473,7	118,753
1988	14502,8	1748,3	4129,3	6097,4	512,3	302,4
1989	14198,5	1626,8	3713,6	6085,6	545,6	1000,4
1990	13441,7	1188,1	3917,7	6424,3	539,8	293,6
1991	13479,4	2025,2	3130,1	6861,5	595,6	331,7
1992	12677,6	1638,6	2352,6	6980,2	562,5	551,1
1993	11794,3	1984,2	2434,4	5945,9	514,1	271,4
1994	9866,8	1278,9	2119,4	5305,1	408,9	295,1
1995	8220,4	1100,6	1630,9	4538,4	415,2	257,5
1996	5879,6	1019,2	1230,6	2745,6	386,9	268,9
1997	4822,9	1028,6	1383,2	1474,8	396,7	296,9
1998	5367,3	1012,7	1625,1	1685,9	445,5	322,2
1999	3819,4	699,6	1309,5	880,6	338,9	318,2
2000	4014,8	764,8	1540,9	660,015	397,8	319,6

Сравнительный анализ структуры ведущих вредных веществ, загрязняющих атмосферный воздух изучаемых городов, показал, что в городе Новополоцке наибольший удельный вес – 45,8 % от общей величины валового выброса – приходится на долю углеводородов. На втором месте сера диоксид (41,2 %), на третьем – азота оксиды (6,81 %), на четвертом – углерод оксид (3,6 %), на последнем – взвешенные вещества (0,65 %). В городе Полоцке наибольший удельный вес приходится на долю серы диоксида (41,3 %), затем следуют углерод оксид (30,0 %), взвешенные вещества (15,6 %), азота диоксида (5,4 %) и углеводороды (4,4 %).

Структуры основных веществ, загрязняющих воздушные бассейны изучаемых городов, значительно отличаются друг от друга. Так, если в городе Новополоцке наибольший удельный вес приходится на долю углеводородов, то в Полоцке данные соединения занимают последнее место. Взвешенным веще-

ствам в Полоцке соответствует 3-е место, а в Новополоцке – последнее. Следует отметить, что в обоих городах сера диоксид занимает второе место с одинаковым удельным весом – около 41 %.

Сокращение валовых выбросов в изучаемых городах достигает значительных величин. Средняя величина валового выброса за 1998...2000 годы в городе Новополоцке почти в 4 раза ниже аналогичного показателя за 1986...1988 годы. В городе Полоцке валовой выброс за изучаемый период уменьшился в 3,5 раза.

Обращает на себя внимание наблюдаемая неравномерность сокращения валового выброса по отдельным веществам. Так, наибольшее сокращение валового выброса в обоих городах регистрируется по сере диоксиду. Его валовой выброс уменьшился в 6,8 раза в Новополоцке и в 5,4 раза в Полоцке. Значительно сократился выброс и взвешенных веществ, и углерод оксида – в среднем почти в 3 раза. Наименьший уровень сокращения валового выброса наблюдается по азоту диоксиду и углеводородам. Так, в Полоцке это сокращение составило 1,1 и 1,3 раза соответственно.

Исходя из вышеизложенного, следует, что ведущими веществами, загрязняющими атмосферный воздух изучаемых городов, являются углеводороды и углерод оксид.

Сравнительный анализ уровней загрязнения атмосферного воздуха в изучаемых городах свидетельствует, что максимальные разовые концентрации взвешенных веществ, азота диоксида, фенола в воздушных бассейнах изучаемых городов практически не отличаются друг от друга. Вместе с тем содержание сероводорода, углерод оксида в значительной степени выше в городе Новополоцке по сравнению с Полоцком. Это объясняется тем, что предприятие ОАО «Нафтан» является массивным источником загрязнения воздушной среды данными веществами. Однако в Полоцке уровень загрязнения атмосферы по максимальным разовым концентрациям серы диоксидом, аммиаком превосходит эту величину в Новополоцке. Более высокий уровень загрязнения серы диоксидом атмосферного воздуха Полоцка объясняется тем, что основным источником поступления в воздушный бассейн данного вещества является Новополоцкая ТЭЦ, выбросы которой поступают в атмосферу на высоте 180 м и рассеиваются на значительном расстоянии от источника загрязнения. Кроме того, как указывалось выше, по величине валового выброса сера диоксид в городе Полоцке занимает первое место.

Процент проб воздуха с превышением максимальных разовых концентраций величин соответствующих предельно допустимых концентраций (ПДК) по всем веществам, кроме взвешенных веществ, выше в городе Новополоцке.

Самые высокие уровни превышения максимальными разовыми концентрациями величин ПДК_{м.р.} в изучаемых городах регистрировались у азота диоксида, сероводорода. У азота диоксида в Новополоцке кратности превышения ПДК колебались от 5,4 до 10,6 раз, а в Полоцке – от 3,3 до 7,7 раз. При этом следует отметить, что уровень превышения ПДК у азота диоксида выше в Новополоцке по сравнению с Полоцком. Аналогичная ситуация наблюдается по концентрациям сероводорода.

Более высокие уровни превышения ПДК регистрируются в Новополоцке также и по углерод оксиду, фенолу, а в первые годы наблюдения и по сере диоксиду. По остальным веществам значения анализируемого показателя в обоих городах практически не отличаются друг от друга. Среднегодовые концентрации всех веществ, за которыми ведется наблюдение, в обоих городах практически не отличаются друг от друга.

Кратность превышения ПДК вредных веществ по величинам максимальных значений разовых концентраций за изучаемый период также имеет тенденцию к снижению. Начиная с 1994 года взвешенные вещества, серы диоксид, аммиак практически не регистрировались в концентрациях выше ПДК, кратности превышения составляли десятые доли ПДК. Кратности превышения максимальной разовой ПДК азота диоксида в первые годы наблюдения колебались от 3,2 до 16 раз при средней величине 7,7 раза, а в последние 3 года разница этих показателей составляла от 2,1 до 14 раз при средней величине 5,9 раза. Таким образом, за сравниваемые трехлетия кратность превышения ПДК_{м.р.} азота диоксида по средним величинам снизилась в 1,3 раза. По остальным изучаемым веществам (углерод оксиду, фенолу, сероводороду) средние величины максимальных кратностей превышения ПДК в последние 3 года наблюдения по сравнению с тремя первыми годами наблюдения снизились в 1,3; 1,26 и 1,4 раза соответственно.

Наиболее сильно тенденция снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха по разовым концентрациям наблюдалась по взвешенным веществам, сере диоксиду, аммиаку. В значительно меньшей степени уменьшилось загрязнение атмосферного воздуха веществами, входящими в состав выброса автомобильного транспорта. Их концентрации, превышающие уровень ПДК, регистрировались на протяжении всего периода наблюдения.

Заключение. Анализ величин валовых выбросов вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух с выбросами промышленных предприятий в изучаемых городах, показал, что ведущими среди них являются взвешенные вещества, азота оксиды, серы диоксид, углерод оксид и углеводороды (см. таблицу).

Структура основных веществ, загрязняющих воздушные бассейны изучаемых городов, значительно отличается друг от друга. Так, если в городе Новополоцке наибольший удельный вес приходится на долю углеводов, то в Полоцке данные соединения занимают последнее место. Взвешенным веществам в городе Полоцке соответствует 3-е место, а в Новополоцке – последнее. Следует отметить, что в обоих городах сера диоксид занимает второе место с одинаковым удельным весом – около 41 %. Сокращение валовых выбросов в этих городах достигает значительных величин. К примеру, Средняя величина валового выброса за 1998...2000 годы в городе Полоцке сократилась за изучаемый период в 3,5 раза.

Для оценки степени загрязнения атмосферного воздуха использовались: максимально разовые, среднесуточные и среднегодовые концентрации, процент проб с концентрациями выше ПДК, кратности превышения ПДК. Анализ величин этих показателей свидетельствует об их снижении. Степень уменьшения зависела от показателя конкретного вещества и колебалась от 1,3 до 6 раз. Средняя величина составляла от 1,5 до 2 раз. По большинству показателей их значения выше в городе Новополоцке.

Таким образом, проведенными исследованиями установлена четко выраженная тенденция снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха за изучаемый период. Однако следует отметить несоответствие между уровнем снижения величин валовых выбросов и показателей, характеризующих степень загрязнения атмосферного воздуха (максимальные разовые, среднегодовые концентрации, процент проб воздуха с содержанием вредных веществ выше ПДК, кратности превышения ПДК), которые снизились в меньшей степени. Следует также отметить, что уровень загрязнения атмосферного воздуха по большинству изучаемых показателей выше в городе Новополоцке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовицкая, М.Л. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий / М.Л. Красовицкая // Руководство по гигиене атмосферного воздуха. – М.: Медицина, 1976. – С. 273 – 302.
2. Методические аспекты оценки риска влияния атмосферных загрязнений на здоровье населения Беларуси / С.М. Соколов [и др.] // Гигиена и санитария. – 2001. – № 5. – С. 90 – 93.
3. Чеботарев, П.А. Охрана атмосферного воздуха от загрязнения углеводородами нефтяного генеза и оценка риска их влияния на состояние здоровья населения / П.А. Чеботарев. – Барановичи, 2004. – 154 с.
4. Характеристика демографических процессов в г. Новополоцке / П.А. Чеботарев [и др.] // Матер. пленума межвед. науч. совета по экологии человека и гигиене окружающей среды Рос. Федерации; под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. – М.: РАМН, 2002. – С. 272 – 275.

Поступила 22.07.2013

CHARACTERISTICS OF CONTAMINATION OF ATMOSPHERIC AIR OF NOVOPOLOTSK AND POLOTSK IN DYNAMICS FROM 1980 TO 2000

P. CHEBOTAREV

Qualitative and quantitative characteristics of the level of contamination of the atmospheric air and its comparative estimation in Novopolotsk and Polotsk for the period of 20 years are demonstrated. A clearly pronounced tendency of the decrease of the contamination level of the atmospheric air is established. But a discrepancy is observed between the level of the decrease of the quantity of the gross emission and indicators, characterizing the level of contamination of the air, which decreased less. The level of contamination of the atmospheric air is higher in Novopolotsk according to the majority of indicators.

УДК 613.6.027+ 51-74

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА НА НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

ЮСРА МОХАММЕД КВИДЖА АЛЬ-ДАЛЕМИ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены различные подходы к определению рискообразующих факторов и к оценке профессионального риска на промышленном предприятии, в том числе нефтехимическом. Проанализированы конкретные количественные, качественные и полуколичественные методы оценки риска. Показано, что оценка риска на одном и том же объекте различными способами приводит к разноречивым результатам. Обосновано применение системного подхода к оценке профессионального риска. Приведена методика оценки профессионального риска на нефтехимическом предприятии, позволяющая учитывать априорную и апостериорную составляющую рисков количественным и качественным способом. Установлено, что границы категорий априорного риска смещаются при изменении числа контролируемых вредных или опасных производственных факторов. Показано, что преимущества разработанной методики могут быть реализованы в рамках прикладного программного обеспечения, что позволит ускорить и автоматизировать процесс оценки профессионального риска на потенциально опасных объектах нефтехимических предприятий.

Введение. Современные нефтехимические производства характеризуются непрерывностью технологических процессов, высокой степенью автоматизации и механизации, дистанционным управлением, позволяющими уменьшить контакт работников с вредными производственными факторами (ВПФ) [1]. Вместе с тем данная отрасль остается потенциально опасной для здоровья работников, поскольку даже в настоящее время на нефтехимических предприятиях сохраняются отдельные виды работ с пребыванием персонала во вредных условиях труда [2]. Неблагоприятные условия труда являются одним из основных факторов риска нарушений здоровья работающих, проявляющихся ростом травматизма, профессиональных заболеваний, а также заболеваемости с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) [3]. В сложившихся условиях сокращения количества и старения трудоспособного населения в большинстве развитых стран особое значение приобретают охрана труда работающего населения, выявление основных закономерностей влияния вредных условий труда на состояние здоровья работников промышленных предприятий, в том числе нефтехимических, создание целостной системы профилактических, лечебно-оздоровительных и реабилитационных мероприятий, направленных на сохранение и укрепление здоровья работающих [4 – 6].

Новые научные подходы к охране здоровья на производстве требуют более глубоких исследований по выявлению «адресности» факторов риска, роли и места каждого из них, что позволило бы эффективно, научно обоснованно прогнозировать развитие рискогенных ситуаций, своевременно разрабатывать меры по снижению последствий их влияния на работающих [3]. Однако в настоящее время нет ни единой методики расчета и управления профессиональным риском, ни единого подхода к определению профессионального риска и его составляющих [3].

Цель данной работы – разработать методику оценки профессионального риска на нефтехимическом предприятии, позволяющую учитывать сочетанное влияние различных производственных факторов на здоровье работающих.

Анализ методик оценки профессионального риска. Главными особенностями профессиональных рисков являются: сложная природа, значительное многообразие, трудно предсказуемые и длительные по времени последствия [3]. Профессиональный риск имеет две составляющие, равные по значимости и отличающиеся по своей природе, – априорную и апостериорную. *Априорная* составляющая обусловлена вредными или опасными условиями труда. *Апостериорная* позволяет оценить ущерб здоровью работников, наносимый их производственной деятельностью во вредных условиях труда.

Существует достаточно много методик для оценки как априорного, так и апостериорного рисков. Эти методики также делятся на качественные, количественные и полуколичественные.

Риск возможно представить как произведение вероятности риск-ситуации, выражаемой через частоту, и серьезности последствий от реализации риска [7]. Являющаяся результатом расчетов риск-матрица использует порядковые величины, может быть согласована со специфическими критериями допустимости, принятыми на конкретном предприятии, не требует специального программного обеспечения и специальных навыков, относительно проста в эксплуатации.

Научно-исследовательский институт медицины труда РАМН рекомендует судить о величине риска по индексу профзаболеваний, который интегрирует их частоту и тяжесть в одночисловом значении.

По виду, степени нетрудоспособности и экспертному медицинскому прогнозу исхода заболевания предложены 5 категорий тяжести профзаболеваний [4; 8 – 10].

Исследователь Е.Е. Кученева в [3] предлагает два способа оценки апостериорного риска: первый – через оценку производственно обусловленной заболеваемости; второй апостериорный риск оценивается как сумма рисков производственного травматизма, профессиональной заболеваемости и заболеваемости с временной утратой трудоспособности, несчастных случаев.

Российский ученый Н.Ф. Измеров исследует несколько способов оценки профессионального риска в нефтегазовой отрасли. Среди рассматриваемых методов комплексных балльных оценок, метод Файн – Кинни, оценка через индекс профессионального риска ($I_{пр}$) [11].

Все эти методы после получения количественных оценок предполагают качественное распределение полученных рисков на приемлемые, условно приемлемые и неприемлемые.

Для количественной оценки через индекс профессионального риска необходимо знать распределение работников в цехе по различным классам труда, определяющим такой показатель, как «вероятность вреда», а также величину относительного риска $ОР$, соответствующего показателю «тяжесть последствий»:

$$ОР = ПЗ_о / ПЗ_{ко}, \tag{1}$$

где $ПЗ_о$ – показатель заболеваемости в основной группе; $ПЗ_{ко}$ – аналогичный показатель заболеваемости в контроле.

Непосредственно оценка профессионального риска проводится матричным методом с использованием таблицы векторов «вероятность вреда» – «тяжесть последствий», на пересечении которых и находится искомое значение величины риска [12].

Качественная оценка профессионального риска проводится путем определения интегральной оценки условий труда и соответствующей ему категории риска, определяющей срочность и тип мероприятий по устранению или минимизации риска. В таблице 1 показаны критерии оценки по данному методу [12, с. 15].

Таблица 1

Классы условий труда и категории профессионального риска

Класс условий труда	Категория профессионального риска
Оптимальный – 1	Риск отсутствует
Допустимый – 2	Пренебрежимо малый (переносимый) риск
Вредный – 3.1	Малый (умеренный) риск
Вредный – 3.2	Средний (существенный) риск
Вредный – 3.3	Высокий (труднопереносимый) риск
Вредный – 3.4	Очень высокий (непереносимый) риск
Опасный – 4	Сверхвысокий риск для жизни, присущий данной профессии

Метод оценки риска посредством комплексных балльных оценок является измененным методом АВПКО и опирается на известность класса условий труда работающих. По данному методу на рабочем месте оцениваются наиболее значимые ВПФ, оценки от 1 до 7, в зависимости от условий труда. Соответствия условий труда и оценок приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка вредных производственных факторов и условий труда

Оценка ВПФ	Класс условий труда по СанПиН 13-2-2007
1	Оптимальные 1
2	Допустимые 2
3	Вредные 3.1
4	Вредные 3.2
5	Вредные 3.3
6	Вредные 3.4
7	Опасные (экстремальные) 4

Затем по полученным балльным оценкам для ОВПФ – опасных и вредных производственных факторов (в данном случае только ВПФ) – определяется по известной формуле [11, с. 16] уровень безопасности рабочей среды S_{nci} :

$$S_{nci} = \frac{x_{\max} - x_i + 1}{x_{\max}}, \quad (2)$$

где x_{\max} – максимально возможная оценка фактора (7); x_i – оценка фактора (фактическая), через который, в свою очередь, рассчитывается обобщенный уровень профессионального риска R_{nc} [11, с. 16]:

$$R_{nc} = 1 - \prod_{i=1}^k S_{nci}. \quad (3)$$

Здесь k – количество учитываемых ОВПФ.

Применяемый в количественном методе Файн – Кинни подход основан на комбинации степени подверженности работника воздействию вредного фактора и вероятности возникновения угрозы на рабочем месте, а также последствий для здоровья и безопасности работников в том случае, если она осуществится.

Изначально в методе Файн – Кинни степень подверженности ($П$) варьируется от 0 (никогда) до 10 (постоянная подверженность). Вероятность ($В$) варьируется от 0 (абсолютно невозможно) до 10 (ожидаемо). Последствия ($По$) варьируются от 1 (минимальные повреждения) до 100 (катастрофа) [11].

Для получения количественной оценки риска P численно выраженные категории подверженности, вероятности и последствий перемножаются:

$$P = П \cdot В \cdot По. \quad (4)$$

Результат находится в интервале от 0 до 10 000. Полученная таким образом величина риска ранжируется по пяти категориям.

Основные результаты и их обсуждение. Необходимость применения комплексного подхода к оценке и планированию снижения профессионального риска нефтехимической отрасли вытекает из множественности рискообразующих факторов и различных методик их классификации и количественной оценки.

В данной работе принято решение предложить двухступенчатую систему оценки полного профессионального риска, учитывающую его априорную и апостериорную составляющие.

На основании изложенного выше разработана методика оценки профессионального риска на нефтехимическом предприятии ведется с учетом следующих положений:

- оценка риска производится в два этапа – сначала определяется числовой показатель риска, затем соответствующая ему категория риска;
- для оценки априорной составляющей профессионального риска используется метод комплексных балльных оценок, модифицированный с учетом условий на выбранном нефтехимическом предприятии;
- для оценки апостериорного риска используется методика из [3], измененная с учетом условий на выбранном предприятии;
- полный риск определяется при помощи матричного подхода через оценки априорной и апостериорной составляющей;
- числовое значение полного уровня риска определяется путем извлечения квадратного корня из произведения оценок априорного и апостериорного рисков.

Матричный подход является эффективным, удобным и простым средством для оценки полного профессионального риска. Корень из произведения выбирается как наиболее подходящий способ объединить обе оценки, полученные разными методами.

Метод комплексных балльных оценок, предложенный в [11], позволяет дать оценку уровню априорного риска с учетом роли каждого ВПФ, что важно при выборе способа снижения риска. Однако автор ссылается на нормы руководства по охране труда для Российской Федерации, которые отличаются от принятых в Республике Беларусь. Поэтому в метод внесены некоторые изменения.

Представляется целесообразным перевести значение априорного риска в трехзначную шкалу с целыми числами баллов. Перевод следует осуществить умножением значений обобщенного профессионального риска по методике Е.А. Бондарь в 100 раз. Результаты вычисления корня округлять до целых.

Учет априорного риска при расчете полного осуществляется только для уровней рабочих мест и цехов. На более высоких уровнях – подразделение, предприятие – априорный риск принимается равным преобладающей оценке предыдущих. Порядок определения полного риска при этом не изменяется.

В условиях различных нефтехимических предприятий контролироваться может от 4 до 10 ОВПФ и ВПФ включительно: химический, биологический, шум, вибрация общая, вибрация локальная, микроклимат, ионизирующее излучение, электромагнитные поля и неионизирующее излучение, тяжесть труда и напряженность труда.

Апостериорный риск оценивается по формуле, включающей травматизм, профессиональную заболеваемость и ЗВУТ [3].

Далее оценки априорного и апостериорного рисков перемножаются, из произведения извлекается квадратный корень, округляется до целых. Количественная оценка полного профессионального риска определяется следующим выражением:

$$R_n = \sqrt{R_{\text{апр}} \cdot R_{\text{апост}}} = \sqrt{R \cdot (R_{\text{мп}} + R_{\text{ЗВУТ}} + R_{\text{ПЗ}})}, \tag{5}$$

где R – значение априорного риска в баллах; $R_{\text{апост}}$ – значение апостериорного риска в баллах по методике [3], рассчитанного через показатели травматизма, ЗВУТ и ПЗ.

В ходе расчетов установлено смещение границ категорий априорного риска в зависимости от числа контролируемых факторов.

Результаты оценки априорного риска с учетом числа контролируемых ВПФ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения обобщенного уровня априорного риска в зависимости от числа контролируемых вредных производственных факторов

Число факторов	Категории рассчитанного априорного риска со значениями, ×100					
	допустимый	умеренный	средний	выше среднего	высокий	крайне высокий
4	14...46	55	63...79	83...92	94...98	99...100
5	14...54	61	68...85	88...95	97...99	99...100
6	14...60	67	72...89	92...97	98...100	100
7	14...66	72	76...92	94...99	99...100	100
8	14...71	76	80...95	96...99	99...100	100
9	14...75	79	83...96	97...100	100	100
10	14...79	82	85...97	98...100	100	100

Категории априорного риска соответствуют условиям труда следующим образом: *нулевой* (риск отсутствует) – условия труда (УТ) класса 1, недостижим в реальных условиях [11], поэтому не рассматривается и не указывается; *допустимый* – УТ класса 2; *умеренный* – УТ класса 3.1; *средний* – УТ класса 3.2; *выше среднего* – УТ класса 3.3; *высокий* – УТ класса 3.4; *крайне высокий*, опасный для жизни – УТ класса 4.

Полная риск-матрица в качественной и количественной форме приведена в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

Категории полного риска, вычисленные через корень произведения оценок, качественная форма

Категории априорного риска	Категории апостериорного риска				
	низкий (1...22)	допустимый (23...49)	существенный (50...84)	высокий (85...147)	катастрофический (от 148)
Допустимый	A	M1	M1	M2	M2
Умеренный	M1	M1	M2	M2	H1
Средний	M1	M2	M2	H1	H1
Выше среднего	M2	M2	H1	H1	H2
Высокий	M2	H1	H1	H2	H2
Крайне высокий	H1	H1	H2	H2	E

Примечание. Искомое значение категории полного риска находится на пересечении строки с известным априорным и столбца с известным апостериорным риском.

Таблица 5

Категории полного риска, вычисленные через корень произведения оценок, количественная форма

Число факторов	Окончательная оценка риска (корень из произведения оценок)					
	A	M1	M2	H1	H2	E
4	4...32	33...62	63...90	91...116	117...121	121...122
5	4...34	35...67	68...95	96...118	119...121	121...122
6	4...36	37...71	72...99	100...119	120...122	122
7	4...38	39...74	75...103	104...121	122	122
8	4...40	41...77	78...106	107...121	122	122
9	4...41	42...79	80...108	109...121	122	122
10	4...42	43...81	82...110	111...121	122	122

Здесь категории рисков: А – допустимый; M1 – умеренный; M2 – средний; H1 – выше среднего; H2 – высокий; E – экстремальный, опасный для жизни.

Разработанная модель двухступенчатой оценки полного риска для работников нефтехимического предприятия позволяет осуществлять следующие операции:

- определять перечень наиболее весомых ВПФ на исследуемом участке, перечень наиболее значимых показателей вреда здоровью работников;
- непосредственно определять уровень априорного, апостериорного и полного профессионального риска на участке; прогнозировать изменение полного риска со временем в зависимости от условий труда;
- определять степень вклада каждой из категорий риска в результирующую оценку.

Программная реализация модели оценки риска осуществляется с использованием среды **Delphi 7.0**, пригодна для работы с операционными системами Windows 95-98, 2000, XP, Vista, Windows 7.

В качестве архитектуры для баз данных программы выбрана технология файл-сервер.

Заключение. По результатам проведенного исследования были сделаны следующие *выводы*:

1) полуколичественные методы оценки профессионального риска позволяют не только установить возможность опасности или вреда здоровью работника, но и количественно оценить вероятность их наступления. Необходимо комплексно оценивать профессиональный риск на нефтехимическом предприятии с применением системного подхода и учетом всех составляющих риска;

2) разработанная методика комплексной оценки профессионального риска, учитывающая апостериорную и априорную составляющую с выделением доли влияния по каждому из значимых ВПФ, позволяет классифицировать наблюдаемые риски качественно по категориям и количественно (в баллах) в зависимости от числа оцениваемых факторов:

- допустимый риск (А);
- умеренный риск (M1);
- средний риск (M2);
- риск выше среднего (H1);
- высокий (H2);
- экстремальный (E);

3) разработанное прикладное программное обеспечение для реализации методики оценки полного риска позволяет автоматизировать процедуру оценки риска, моделировать, анализировать и косвенно прогнозировать вероятность изменения полного риска при изменении условий труда или показателей состояния здоровья работников нефтехимического предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримова, Л.К. Комплексная гигиеническая оценка условий труда и состояния здоровья работающих в современном производстве этилена и пропилена: автореф. дис. ...канд. мед. наук / Л.К. Каримова. – М., 1984. – 23 с.
2. Гизатуллина, Д.Ф. Условия труда и состояние здоровья ремонтных рабочих современных нефтехимических производств; дис. ... канд. мед. наук / Д.Ф. Гизатуллина. – М., 2010. – 192 с.
3. Кученева, Е.Е. Прогнозирование профессионального риска и разработка системы управления им на потенциально опасных промышленных объектах: дис. ... канд. тех. наук / Е.Е. Кученева. – Минск, 2009. – 130 с.

4. Измеров, Н.Ф. Оценка профессионального риска в медицине труда: принципы, методы и критерии / Н.Ф. Измеров, Э.И. Денисов // Вестн. РАМН. – 2004. – № 2. – С. 17 – 21.
5. Устюшин, Б.В. Гигиена и физиология труда горнорабочих при добыче полиметаллических руд на Крайнем Севере / Б.В. Устюшин, Р.В. Борисенкова // Гигиена и санитария. – 1998. – № 1. – С. 7 – 9.
6. Потапов, А.И. Проблема риска в решении задач гигиенической безопасности России / А.И. Потапов, Г.Г. Ястребов // Региональные проблемы развития мониторинга окружающей среды и вопросы гигиенической безопасности: сб. науч. тр. – Майкоп, 1998. С. 5 – 8.
7. Ertugrul, Alp. Risk Assessment and Process Safety Management / Alp Ertugrul // CSChE PSM Award Presentation, October 29, 2007 57th Chemical Engineering Conference Edmonton, Alberta.
8. Демин, В.Ф. Нормирование различных видов риска / В.Ф. Демин, В.Я. Голиков // Гигиена и санитария. – 2002. – № 6. – С. 30 – 36.
9. Измеров, Н.Ф. Человек и шум / Н.Ф. Измеров, Г.А. Суворов, Л.В. Прокоменко. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2001. – 384 с.
10. Лобанов, Д.В. Оценка профессионального риска / Д.В. Лобанов // Охрана труда и социальное страхование. – 1997. – № 20. – С. 41 – 49.
11. Бондарь Е.А. Метод расчета оптимальной программы снижения профессионального риска для работников нефтегазовой отрасли: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Бондарь. – Калининград, 2009. – 167 с.
12. Критерии оценки и показатели производственно обусловленной заболеваемости для комплексного анализа влияния условий труда на состояние здоровья работников, оценки профессионального риска: инструкция по применению / Р.Д. Клебанов [и др.]. – Минск, 2009. – 28 с.

Поступила 17.05.2013

PROFESSIONAL RISK ASSESSMENT AT PETROCHEMICAL ENTERPRISE

JUSRA MOKHAMMED KVIDJA AL-DALEMI

Different approaches to determination of forming factors and to assessment of the occupational exposure at an industrial enterprise, including petrochemical are considered. The concrete quantitative, qualitative and semi-quantitative risk assessment methods are considered. It is shown that the risk assessment for the same object in different ways leads to contradictory results. The application of a systematic approach to the assessment of occupational risk is justified. The article contains the technique of occupational risk assessment at a petrochemical plant, which allows to take into account both a priori and a posteriori risk components in quantitative and qualitative ways. It is established that the boundaries of the categories of a priori risk are displaced when the number of controlled harmful or hazardous factors is changed. It is shown that the advantages of the developed method can be implemented as part of the application software, which will accelerate and automate the process of occupational exposure assessment at potentially dangerous objects of petrochemical plants.

УДК 628.35

ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД ПОСЛЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРУДОВ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

*д-р мед. наук, доц. П.А. ЧЕБОТАРЕВ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены исследования осадка сточных вод после биологических прудов нефтеперерабатывающего предприятия. Анализ полученных результатов позволил установить, что обнаруженные в осадке химические вещества (углеводороды, металлы) содержатся в концентрациях, не оказывающих негативного влияния на общесанитарное состояние почвы и водных объектов. По параметрам острой токсичности осадок относится к веществам IV класса опасности и не содержит в своем составе патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов и их цист.

В настоящее время у общественности всего мира нашел всеобщее понимание тот факт, что сохранение здоровья населения зависит не только от социальных и экономических факторов, но и в значительной степени от состояния окружающей среды. Учитывая, что больше половины населения Беларуси проживает в промышленно развитых городах, проблемы охраны здоровья городской популяции в связи с нарастающим загрязнением окружающей среды были и остаются весьма актуальными и важными как в настоящее время, так и на отдаленную перспективу.

Существующий сегодня уровень загрязнения объектов окружающей среды создает условия постоянной нагрузки на адаптационные механизмы, часто приводя к дезадаптации и «готовности» организма к возникновению заболеваний. Наряду с немедленными реакциями организма на воздействие химического фактора – острое отравление, аллергияция и др. – серьезную проблему представляют так называемые отдаленные, в том числе «отставленные» эффекты: отдаленные поражения сосудов и сердца, мутагенез, бластомогенез, хронические заболевания легких и печени, нарушение репродуктивной функции (изменение гонад, влияние веществ на плод и потомство).

Научно-технический прогресс превратил нефтеперерабатывающую промышленность в наиболее развивающуюся, высокопроизводительную, передовую в техническом и гигиеническом отношении отрасль [1 – 4]. Общеизвестно, что переработка нефти и получение нефтепродуктов связаны с потреблением значительного количества воды, которая используется как в виде реагента в физико-химических процессах переработки нефти и ее продуктов, так и для поддержки в заданных пределах параметров технологических регламентов, обеспечивающих оптимальное протекание этих процессов: охлаждения и промывки оборудования, очистки сырой нефти, регенерации катализаторов. Естественно, что это приводит к образованию значительного количества сточных вод.

Не является исключением в этом плане и нефтеперерабатывающее предприятие, расположенное в городе Новополоцке. Так, в конце 1980 – начале 1990-х годов на 1 тонну перерабатываемой нефти и нефтепродуктов использовалось от 0,013 до 2,5 м³ (для производства различной продукции) свежей воды, при этом образовывалось около 1,5 тыс. м³/ч общезаводских сточных вод. Общезаводские неочищенные производственные сточные воды характеризуются сильным запахом нефтепродуктов, бурой окраской, малой прозрачностью. В них присутствуют соединения серы (сероводород, меркаптаны, тиофены, дисульфиды и др.), соединения азота (аммиак, аминоканалы, аминоканалены, полиамины и др.), соединения кислорода (фенолы, крезолы и их аминоканалы), соединения металлов (кобальта, никеля, марганца, свинца, кадмия, цинка и др.). Ведущими веществами, содержащимися в сточных водах нефтеперерабатывающих предприятий, являются углеводороды. В сточных водах ПО «Нафтан» содержание взвешенных веществ составляет 100...130 мг/л, фенолов 20...130 мг/л, нефтепродуктов 500...3000 мг/л, сухого остатка 1000...1500 мг/л, из которых около 50 % приходится на органические вещества, сульфидов (100 мг/л и более). Несомненно, перед сбросом в водоем данные сточные воды подвергаются тщательной очистке.

Основная часть. Биологическая очистка сточных вод основана на способности микроорганизмов разрушать (минерализовать) содержащиеся в сточных водах органические вещества (загрязнения). Сточные воды проходят целый комплекс очистных сооружений, состоящих из песколовок, нефтеловушек, первичных отстойников, аэротенков, вторичных отстойников, биофильтров, где большинство из вышеперечисленных веществ разрушается или концентрации их значительно уменьшаются. Последней стадией очистки сточных вод являются биологические пруды.

После очистки воды в первичных отстойниках хозяйственно-бытовых сточных вод и вторичных отстойниках промышленных сточных вод было установлено наличие в этих осадках условно-патогенной микрофлоры, яиц гельминтов, содержание солей металлов в концентрациях, превышающих ПДК. Прове-

денные токсикологические исследования позволили отнести эти осадки к третьему классу опасности. Однако эти осадки образовывались на первых стадиях очистки сточных вод, после которых они направлялись на биологические фильтры и далее в биопруды.

Осадки сточных вод после биопрудов хранятся на специальных картах, и они занимают в настоящее время значительные площади. Поэтому весьма актуальной является проблема их утилизации.

Определенный интерес в связи с этим вызывает *санитарно-гигиеническая оценка осадка сточных вод после биологических прудов*. Ведущими компонентами на этой стадии очистки сточных вод являются углеводороды в связи с высоким исходным уровнем их содержания, а также соединения металлов, неорганические формы которых проходят транзитом через стадии очистных сооружений. Поэтому определению содержания этих веществ было отдано предпочтение при физико-химических методах исследований осадка сточных вод после биологических прудов. Особое внимание уделялось ароматическим углеводородам, которые обладают наиболее высокой токсичностью по сравнению с другими классами углеводородов – алканами и нафтенами, олефинами. Суммарное содержание углеводородов во всех изученных пробах определялось практически на одном уровне и колебалось в незначительных пределах от 55,0 до 683 мг/м³. То же самое наблюдалось по ароматическим углеводородам. Так, концентрации бензола составляли во всех изученных пробах 8,7; 9,0; 8,5 мг/м³.

Анализ материалов нормирования химических веществ в почве показывает, что в зависимости от специфики вещества *лимитирующие показатели вредности* различны:

- для нефтепродуктов – это миграционный воздушный;
- для металлов – общесанитарный и транслокационный.

Установленные нами концентрации углеводородов в осадках сточных вод превышают их ПДК в почве в десятки раз. Так, максимальные концентрации бензола выше регламентируемой величины в 30, толуола – в 35, ксилола – 36 раз. Однако, как указывалось выше, лимитирующим показателем вредности для этих веществ является миграционный воздушный, поэтому они не представляют опасности для почвы и воды водоемов.

Концентрации металлов в осадке сточных вод после биологических прудов, кроме цинка, определялись в концентрациях ниже ПДК в почве. Содержание цинка в 2 раза выше ПДК, в 1,3 раза – общесанитарного показателя вредности, в 4 раза ниже водного миграционного показателя. Таким образом, наличие металлов в изучаемом осадке не окажет существенного влияния на окружающую среду при их утилизации.

Количество вредных веществ, содержащихся в сточных водах нефтеперерабатывающих предприятий, достигает значительных величин (от 150 до 250 различных веществ), и определение концентраций всех их практически невозможно. Кроме того, на большинство из них не разработаны предельно-допустимые концентрации их содержания в воде водоемов и почве.

Ввиду этого единственной возможностью дать эколого-гигиеническую оценку опасности осадков сточных вод после биологических прудов являются экспериментальные исследования на животных. Для установления опасности изучаемых осадков были выявлены параметры их острой токсичности. С этой целью проводились исследования по установлению наиболее надежного параметра – средней смертельной дозы. При этом установлено, что однократное внутрижелудочное введение самцам белых крыс разведенного в дистиллированной воде изучаемого осадка в количестве 7500 мг/кг за весь период наблюдения (14 дней) не вызывало смертельных исходов. Животные оставались активными, хорошо поедали корм, шерстный покров оставался гладким, блестящим.

Согласно литературным данным многие вредные вещества, содержащиеся в сточных водах нефтеперерабатывающих предприятий, обладают раздражающим действием. С целью установить наличие или отсутствие этого эффекта проведена инстилляция суспензии осадка сточных вод в объеме 0,05 см³ в нижний конъюнктивальный мешок глаза кроликов. Это не вызывало гиперемии конъюнктивы и слизистой век (0 баллов), выделений из глаз (0 баллов).

Общеизвестно, что углеводороды могут всасываться в организм через кожу, поэтому были проведены однократные аппликации нативного осадка сточных вод белым крысам в дозе 20 мг/см² на выстриженные участки кожи спины размером 4×4 см. Аппликации не вызывали у них внешних признаков интоксикации. На протяжении всего периода наблюдений поведение подопытных животных не отличалось от поведения контрольных. В области аппликаций кожа у крыс оставалась без изменений, что доказывает отсутствие кожно-резорбтивного эффекта. Таким образом, изучаемые осадки не обладают раздражающим и кожно-резорбтивным действием.

На основании проведенных токсикологических исследований изучаемые отходы можно отнести к малоопасным химическим соединениям (IV класс опасности согласно ГОСТ 12.1.007-76).

Сточные воды нефтеперерабатывающего предприятия перед очисткой разбавляются бытовыми сточными водами города Новополоцка, поэтому помимо токсического воздействия на объекты окружающей среды осадки сточных вод могут представлять определенную эпидемиологическую опасность. В связи с этим были проведены их микробиологическое и гельминтологическое исследования, которые

показали, что изучаемые осадки не содержат патогенных форм микроорганизмов, яиц гельминтов и их цист. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [5], указывающими, что двухгодичное выдерживание осадков сточных вод на иловых площадках приводит к полному их очищению от патогенной микрофлоры и гельминтов. Пробы осадков сточных вод нами были взяты с карт со сроком их хранения от 3-х и более лет.

Заключение. Переработка нефти и получение нефтепродуктов связаны с потреблением значительного количества воды, что приводит к образованию большого количества сточных вод. Неочищенные сточные воды характеризуются сильным запахом нефтепродуктов, бурой окраской, малой прозрачностью и содержат в своем составе соединения серы, азота, кислородосодержащие соединения, соединения металлов. Ведущими веществами в сточных водах нефтеперерабатывающих предприятий являются углеводороды. Сточные воды проходят целый комплекс очистных сооружений, что приводит к разрушению вышеперечисленных веществ или к значительному снижению их концентраций. Так, после очистки в осадках этих сооружений было обнаружено наличие условно патогенной микрофлоры, яиц гельминтов, содержание солей металлов в концентрациях, превышающих допустимый уровень. Проведенные токсикологические исследования позволили отнести эти осадки к третьему классу опасности. Следует отметить, что эти осадки образовывались на первых стадиях очистки, после чего они направлялись на биологические фильтры и далее в биопруды.

Обнаруженные уровни содержания углеводородов и металлов в изучаемых осадках могут оказывать негативное влияние на человека опосредованно через атмосферный воздух и растения, потребляемые в пищу, но для санитарного состояния самой почвы и водных бассейнов они безопасны. Поэтому утилизация осадка с учетом содержания в них углеводородов и металлов возможна при условии использования их вне населенных мест и земель, применяемых для выращивания сельскохозяйственных культур.

Таким образом, обнаруженные в сточных водах после биологических прудов химические вещества (углеводороды, металлы) содержатся в концентрациях, не оказывающих негативного влияния на общесанитарное состояние почвы и водных объектов; по параметрам острой токсичности они относятся к веществам IV класса опасности и не содержат в своем составе патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов и их цист, что позволяет изученный осадок использовать при проведении планировочных работ на территории промышленной площадки предприятия, обусловленных строительством или реконструкцией промышленных установок и ремонтом подземных коммуникаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басгрый, Е.И. Нефтехимия и защита окружающей среды / Е.И. Басгрый, А.И. Нехаев // Нефтехимия. – 1999. – № 2. – С. 83 – 97.
2. Доценко, И.И. Химическая промышленность и охрана окружающей среды / И.И. Доценко. – Киев: Вища школа, 1996. – 185 с.
3. Дегтярев, В.В. Охрана окружающей среды / В.В. Дегтярев. – М.: Транспорт, 1989. – 208 с.
4. Федоров, В.С. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность в десятой пятилетке / В.С. Федоров // Журнал Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. – 1977. – Т. 22, № 2. – С. 131 – 136.
5. Чергинец, Г.Я. Сравнительная гигиеническая оценка технологических схем обработки осадков городских сточных вод, используемых в качестве удобрения / Г.Я. Чергинец, Н.П. Вашкулат, Н.Д. Аксиленко // Гигиена и санитария. – № 11.

Поступила 18.07.2013

ECOLOGICAL AND HYGIENIC ASSESSMENT OF SEWAGE SLUDGE AFTER BIOLOGICAL PONDS AT REFINERIES

P. CHEBOTAREV

Investigations of sewage sludge after biological ponds at refineries have been conducted. It has been established that chemicals (hydrocarbons, metals) found in sludge are present in concentrations that do not harm the sanitary state of soil and water objects. Acute toxicity parameters refer the sludge to Class 4 of hazardous substances. The sludge does not contain pathogenic microorganisms, helminth eggs and cysts in its structure.

УДК 51-74

ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

*д-р техн. наук, доц. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ,
канд. физ.-мат. наук, доц. О.В. ГОЛУБЕВА, Д.В. ПЯТКИН
(Полоцкий государственный университет)*

Реализован полноценный метод моментов, позволяющий определить плотность вероятности случайной величины (координаты элементарного акта сорбции) через совокупность ее начальных моментов. В результате анализа зависимости этих моментов от времени получен вид асимптотики проскока при больших временах. Оценена погрешность при замене точного решения его асимптотическим выражением. Найденные решения позволяют сократить временные затраты в актуальном диапазоне аргументов в $10^4 \dots 10^5$ раз, в результате чего скорость численных экспериментов, как и сами их возможности, выводятся на качественно иной уровень.

Задача динамики сорбции лежит в основе многих промышленных и природоохраных технологий. Обычно для моделирования этого процесса используют уравнения математической физики. В частности, в области Генри после формирования квазистационарного распределения концентрации сорбтива доля его проскочивших молекул может быть найдена как решение интегро-дифференциального уравнения:

$$-\omega'_\xi = e^{-\tau} \left(e^{-\xi} + \int_0^\tau e^\tau d_\tau \omega \right), \quad (1)$$

где ω – приведенная концентрация сорбтива; ξ, τ – соответственно обезразмеренные координата и время [1].

Каждая порция регенерируемого воздуха содержит огромное (сравнимое с числом Авогадро) количество практически не взаимодействующих молекул примеси. То есть по закону больших чисел вероятность их проникновения в поглощающий слой на глубину ξ фактически не отличается от относительной частоты этого события $\omega(\xi, \tau)$. Соответственно, $1 - \omega(\xi, \tau)$ есть вероятность поглощения молекулы примеси таким слоем сорбента, а $f(\xi, \tau)$ – плотность упомянутой вероятности:

$$f(\xi, \tau) = \frac{\partial(1 - \omega(\xi, \tau))}{\partial \xi} = -\omega'_\xi(\xi, \tau). \quad (2)$$

Предложенная интерпретация $\omega(\xi, \tau)$ позволяет подключить к исследованию сорбционной активности мощный дополнительный ресурс, не задействованный в идеологии уравнений математической физики¹. В частности, вид $f(\xi, \tau)$ может быть установлен вариационно (без уравнения (1)) из независимых соображений, основанных на экстремальности энтропии. Так, в начальный момент ($\tau = 0$), когда сорбент не загрязнен и нет оснований какой-либо его участок предпочесть остальным, экстремальность S на полубесконечном интервале обеспечивается экспоненциальным законом [2], что и подтверждается непосредственным расчетом (см. формулы (1), (2)):

$$f(\xi, 0) = e^{-\xi}. \quad (3)$$

Чтобы выяснить, во что эволюционирует (3), необходимо установить зависимость от времени начальных моментов координаты элементарного акта сорбции:

$$v_n(\tau) = \int_0^\infty \xi^n f(\xi, \tau) d\xi. \quad (4)$$

Это было сделано в [3].

Рекуррентное соотношение имеет вид

$$v_n(\tau) = n \cdot \left[v_{n-1}(\tau) + \int_0^\tau v_{n-1}(\tau) d\tau \right]. \quad (5)$$

¹ В действительности такой ресурс задействован неявно, так как при описании кинетики сорбции использованы теоремы умножения вероятности и газовые законы, в основе которых нивелировка начальных условий движения молекул, ведущая к возрастанию энтропии S . Именно по этой причине решение уравнения (1) автоматически обеспечивает условный (в рамках рассматриваемой модели) максимум S в каждый момент времени, что и позволяет надеяться на успех развиваемого подхода.

Вместе с условием нормировки

$$v_0(\tau) = \int_0^{\infty} f(\xi, \tau) d\xi = 1 \quad (6)$$

соотношение (5) позволяет последовательно определить все $v_n(\tau)$ до любого номера² и заметить общую закономерность:

$$v_n(\tau) = n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l, \quad (7)$$

где C_n^k – числа сочетаний.

Зная начальные моменты $v_n(\tau)$, нетрудно найти соответствующие центральные моменты, отвечающие искомому закону распределения ξ :

$$\mu_n(\tau) = \int_0^{\infty} (\xi - v_1(\tau))^n f(\xi, \tau) d\xi. \quad (8)$$

Выполнив под знаком интеграла в (7) биномиальное разложение, получим после интегрирования

$$\mu_n(\tau) = \sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^{n-i} \cdot v_{n-i}(\tau) \cdot v_1^i(\tau). \quad (9)$$

В частности, из (9), (7) следует, что

$$v_1(\tau) = 1 + \tau = m(\tau), \quad (10)$$

$$\mu_2(\tau) = 1 + 2\tau = \sigma^2(\tau), \quad (11)$$

где $m(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение координаты элементарного акта сорбции ξ . Согласно (10), (11) при $\tau = 0$ среднеквадратическое отклонение совпадает с математическим ожиданием, как это и должно быть при экспоненциальном распределении случайной величины. Далее σ растет. Это означает, что график $f(\xi, \tau)$ не смещается как целое по мере отработки слоев продукта. Иными словами, меняется сам вид функции распределения. Существенно при этом, что $\sigma(\tau)$ растет медленнее, чем $m(\tau)$. Критическим является условие:

$$3\sigma(\tau) \leq m(\tau), \quad (12)$$

по достижении которого патрон из полубесконечного превращается как бы в бесконечный, ибо левее точки $\xi = m(\tau) - 3\sigma(\tau)$ в соответствии с правилом «3 σ » функция $f(\xi, \tau)$ практически не отличается от нуля. Такие времена будем называть большими. Согласно (10)...(12) наступают они при $\tau \geq 18$. Выполнение (12) приводит к новому качеству, так как экстремальность энтропии S на всей числовой оси обеспечивается уже не экспоненциальным, а нормальным распределением случайной величины (рис. 1) [2]:

$$f(\xi, \tau) \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} f_N(\xi, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\tau)}} e^{-\frac{(\xi - m(\tau))^2}{2\sigma(\tau)^2}}. \quad (13)$$

В справедливости последних рассуждений можно убедиться и непосредственно, вычислив с помощью (9), (11) асимметрию и эксцесс функции распределения:

$$A(\tau) = \frac{\mu_3(\tau)}{\sigma^3(\tau)} = \frac{6\tau + 2}{(2\tau + 1)^{3/2}} = \frac{3}{\sigma(\tau)} - \frac{1}{\sigma^3(\tau)}, \quad (14)$$

$$E(\tau) = \frac{\mu_4(\tau)}{\sigma^4(\tau)} - 3 = \frac{9 + 36\tau + 12\tau^2}{(2\tau + 1)^2} - 3 = \frac{24\tau + 6}{(2\tau + 1)^2} = \frac{12}{\sigma^2(\tau)} - \frac{6}{\sigma^4(\tau)}. \quad (15)$$

Видно, что асимметрия и эксцесс являются бесконечно малыми при $\tau \rightarrow \infty$, как это и должно быть в случае нормального распределения случайной величины.

² Заметим, что для вычисления $v_n(\tau)$ мы использовали уравнение (1), но не решали его, что также является преимуществом развиваемого подхода.

Для логического завершения работы осталось определить отклонение асимптотического выражения (13) от дифференциальной функции распределения при конечных временах

$$f(\xi, \tau) = f_N(\xi, \tau) \cdot (1 + \varphi(\xi, \tau)), \quad (16)$$

где $\varphi(\xi, \tau)$ – относительная погрешность, возникающая при замене $f(\xi, \tau)$ нормальным законом.

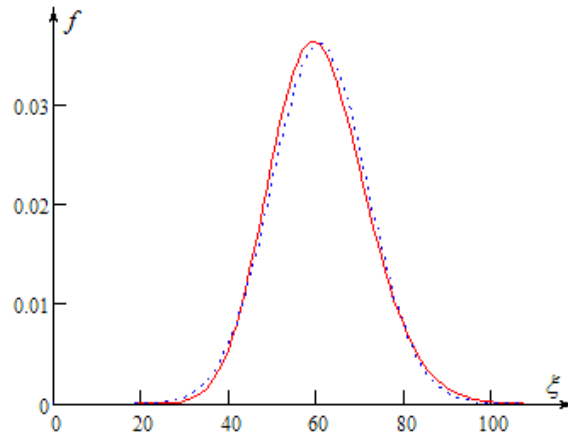


Рис. 1. Асимптотика дифференциальной функции распределения координаты элементарного акта сорбции при больших временах:
 $f(\xi, 60)$ – сплошная кривая; $f_N(\xi, 60)$ – пунктир

Прежде всего, получим уравнение относительно $\varphi(\xi, \tau)$.

Дифференцирование (1) по τ и ξ дает

$$f_{\xi\tau}'' + f_{\xi}'' + f_{\tau}' = 0. \quad (17)$$

Подставив (16) в (17), получим после сокращения на $f_N(\xi, \tau)$ искомое уравнение

$$\begin{aligned} & \varphi_{\xi\tau}'' + \varphi_{\xi}'' \left[1 - \sigma^{-2}(\tau) + \sigma^{-2}(\tau)(\xi - m(\tau)) + \sigma^{-4}(\tau)(\xi - m(\tau))^2 \right] + \\ & + \varphi_{\tau}' \left[1 - \sigma^{-2}(\tau)(\xi - m(\tau)) \right] + (1 + \varphi) \left[3\sigma^{-4}(\tau)(\xi - m(\tau)) - \sigma^{-6}(\tau)(\xi - m(\tau))^3 \right] = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражения в квадратных скобках таковы, что удобно перейти в систему координат, связанную с работающим слоем сорбента и в качестве характерного размера использовать среднеквадратическое отклонение:

$$x(\xi, \tau) = (\xi - m(\tau)) / \sigma(\tau). \quad (19)$$

При этом в (18) останется явная зависимость только от x и σ

$$\varphi_{\xi\tau}'' + \varphi_{\xi}'' \left[1 - \sigma^{-2}(\tau) + \sigma^{-1}(\tau)x + \sigma^{-2}(\tau)x^2 \right] + \varphi_{\tau}' \left[1 - \sigma^{-1}(\tau)x \right] + (1 + \varphi)\sigma^{-3}(\tau) \left[3x - x^3 \right] = 0, \quad (20)$$

т.е. в движущейся системе координат вся эволюция φ обусловлена только изменением σ :

$$\varphi_{\tau}' = \varphi_x' x_{\tau}' + \varphi_{\sigma}' \sigma_{\tau}' = \varphi_x' (-\sigma^{-1} - x\sigma^{-2}) + \varphi_{\sigma}' \sigma^{-1}, \quad (21)$$

где последнее равенство записано с учетом (11).

Согласно (19) также имеет место равенство:

$$\varphi_{\xi}' = \varphi_x' x_{\xi}' = \varphi_x' \sigma^{-1}. \quad (22)$$

Подставив (19), (21) и (22) в (20), получим

$$-\varphi_{xx}'' \left[\sigma^{-2} + x\sigma^{-3} \right] + \varphi_{x\sigma}'' \sigma^{-2} + \varphi_x' \left[-2\sigma^{-3} + 2x^2\sigma^{-3} + x\sigma^{-2} \right] + \varphi_{\sigma}' \left[\sigma^{-1} - x\sigma^{-2} \right] = (1 + \varphi)\sigma^{-3} \left[x^3 - 3x \right]. \quad (23)$$

Решение (23) удобно искать в виде

$$\varphi(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(x(\xi, \tau))}{\sigma^n(\tau)}, \tag{24}$$

где $\varphi_n(x)$ – некоторые функции, подлежащие определению.

Подставив (24) в (23) и сгруппировав слагаемые одинаковых порядков по σ^{-1} , приравняем их по отдельности нулю:

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{-3} & \left| \begin{aligned} -\varphi_1'' + x\varphi_1' - \varphi_1 &= x^3 - 3x; \\ \sigma^{-4} & \left| \begin{aligned} -\varphi_2'' + \varphi_2'x - 2\varphi_2 &= \varphi_1(x^3 - 4x) - \varphi_1'(2x^2 - 3) + x\varphi_1'; \\ \sigma^{-5} & \left| \begin{aligned} -\varphi_3'' + \varphi_3'x - 3\varphi_3 &= \varphi_2(x^3 - 5x) - \varphi_2'(2x^2 - 4) + x\varphi_2'; \\ \sigma^{-6} & \left| \begin{aligned} -\varphi_4'' + \varphi_4'x - 4\varphi_4 &= \varphi_3(x^3 - 6x) - \varphi_3'(2x^2 - 5) + x\varphi_3'; \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \sigma^{-n-2} & \left| \begin{aligned} -\varphi_n'' + \varphi_n'x - n\varphi_n &= \varphi_{n-1}(x^3 - (n+2)x) - \varphi_{n-1}'(2x^2 - n - 1) + x\varphi_{n-1}'. \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \tag{25}$$

Полученная бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений позволяет развить итерационную процедуру, основанную на подстановке решения предыдущего уравнения в правую часть следующего. Из этого, а также структуры первого уравнения следует, что функции $\varphi_n(x)$ являются полиномами, старшая степень которых кратна трем:

$$\varphi_n(x) = \sum_{k=0}^{3n} c_{nk} x^k, \tag{26}$$

где c_{nk} – неизвестные числовые коэффициенты.

Полезно также учесть, что согласно (24), (14), (15), (16) полиномы $\varphi_{2n-1}(x)$ содержат только нечетные степени x и дают вклад в асимметрию $f(\xi, \tau)$. В противном случае они бы давали вклад и в эксцесс, который, однако, не содержит нечетных степеней σ^{-1} (см. (15)). Аналогично $\varphi_{2n}(x)$ – являются четными функциями x и обеспечивают эксцесс $f(\xi, \tau)$:

$$\varphi_{2n-1}(x) = \sum_{k=0}^{3n-2} c_{2n-1, 2k+1} x^{2k+1}; \quad \varphi_{2n}(x) = \sum_{k=0}^{3n} c_{2n, 2k} x^{2k}. \tag{27}$$

В этом можно убедиться и непосредственно, подставив выражения (27) в соответствующие уравнения (25). Выполнив дифференцирование и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях x в левой и правой частях n -го уравнения, получим систему линейных алгебраических уравнений относительно искомым c_{nk} . К сожалению, получаемая таким образом система имеет бесконечное множество решений, отличающихся значениями одного произвольного параметра. Чтобы доопределить систему уравнений относительно c_{nk} , ее надо дополнить еще одним линейно независимым уравнением, для получения которого можно использовать имеющуюся информацию о центральных моментах (см. (7)...(9)). Проиллюстрируем изложенное двумя шагами упомянутой итерационной процедуры.

В соответствии с (27) $\varphi_1(x)$ содержит только нечетные степени x , не старше третьей:

$$\varphi_1(x) = c_{11}x + c_{13}x^3. \tag{28}$$

Подставив это выражение в первое уравнение (25) и выполнив дифференцирование, приравняем коэффициенты при одинаковых степенях x слева и справа:

$$\left. \begin{aligned} x^3 & \left| \begin{aligned} -c_{13} + 3c_{13} &= 1 \\ x^1 & \left| \begin{aligned} -6c_{13} - c_{11} + c_{11} &= -3 \end{aligned} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \Rightarrow c_{13} = 0,5. \tag{29}$$

Видно, что полученная система состоит из линейно зависимых уравнений и имеет бесчисленное множество решений, отличающихся значением c_{11} . Его подберем так, чтобы матожидание x , которое

можно интерпретировать как приведенный центральный момент первого порядка случайной величины ξ (см. (19), (8)), тождественно равнялось нулю в соответствии со смыслом этой переменной:

$$0 = M(\tau) = \int_0^{\infty} f_N(\xi, \tau) \left(1 + \sigma^{-1}(0,5x^3(\xi, \tau) + c_{11}x(\xi, \tau) + \dots)\right) x(\xi, \tau) d\xi = \int_{-m(\tau)/\sigma(\tau)}^{\infty} (2\pi)^{-1/2} e^{-\frac{x^2}{2}} \left[x + \sigma^{-1}(0,5x^4 + c_{11}x^2) + \dots\right] dx. \quad (30)$$

При больших временах первое слагаемое в квадратных скобках не дает вклада в матожидание, так как $m(\tau)/\sigma(\tau) \rightarrow \infty$ (см. (21), (22)), и возникает интеграл от нечетной функции в симметричных пределах. С учетом этого обстоятельства из (30) следует

$$c_{11} = -0,5 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} x^4 dx \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} x^2 dx = -\frac{3}{2}. \quad (31)$$

Определяемая формулами (28), (29), (31) поправка хорошо описывает отклонение функции распределения $f(\xi, \tau)$ от нормального закона (рис. 2, пунктирная кривая).

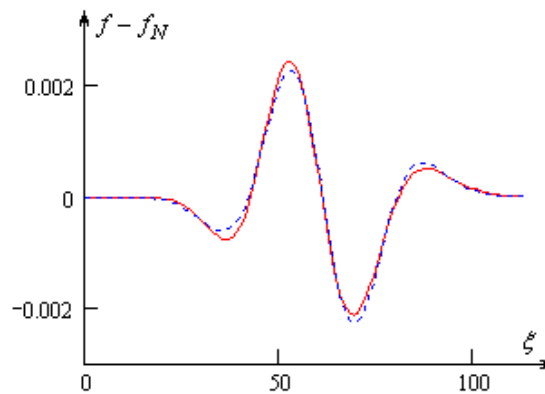


Рис. 2. Отклонение $f(\xi, 60)$ от нормального закона (сплошная кривая) и вклад в него поправки первого порядка по σ^{-1} (пунктир)

Для второго шага итерационной процедуры подставим найденную

$$\varphi_1(x) = -\frac{3}{2}x + \frac{1}{2}x^3 \quad (32)$$

в правую часть второго уравнения (25). В результате после дифференцирования и приведения подобных получим уравнение для определения $\varphi_2(x)$:

$$-\varphi_2'' + \varphi_2' x - 2\varphi_2 = 0,5(x^6 - 13x^4 + 33x^2 - 9). \quad (33)$$

Его решение будем искать в виде четного многочлена шестой степени.

Опять применив метод неопределенных коэффициентов, получим

$$\varphi_2(x) = c_{20} + c_{22}x^2 + \frac{1}{8}x^6 - \frac{11}{8}x^4 \quad (34)$$

и уравнение, связывающее коэффициенты c_{20} и c_{22} :

$$c_{20} + c_{22} = 9/4. \quad (35)$$

Дополним (35) следствием из определения дисперсии при $\tau \rightarrow \infty^3$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2/2} \left(c_{20}x^2 + c_{22}x^4 + \frac{1}{8}(x^8 - 11x^6) \right) dx = 0. \quad (36)$$

³ Нулевое приближение обеспечивает точное значение дисперсии, вклад первого приближения равен нулю в силу нечетности $\varphi_1(x)$.

Фигурирующие в (36) интегралы вычисляются дифференцированием по параметру, что дает искомую связь

$$c_{20} + 3c_{22} = 15/2 \tag{37}$$

и позволяет, решив систему (35), (37), завершить определение $\varphi_2(x)$ (см. (34)):

$$c_{20} = -3/8, \quad c_{22} = 21/8. \tag{38}$$

Если в (14), (15) и (24) пренебречь слагаемыми третьего и более высоких порядков по σ^{-1} , то нечетную часть относительной погрешности при замене $f(\xi, \tau)$ нормальным законом (13) можно связать с асимметрией, а четную – с эксцессом функции распределения:

$$\varphi(\xi, \tau) \approx \frac{A(\tau)}{6} (x^3(\xi, \tau) - 3x(\xi, \tau)) + \frac{E(\tau)}{96} (-3 + 21x^2(\xi, \tau) - 11x^4(\xi, \tau) + x^6(\xi, \tau)). \tag{39}$$

Благодаря фигурирующему в (16) быстро убывающему множителю $f_N(\xi, \tau)$ в актуальном диапазоне значений модуль x ограничен, что при больших временах (см. (14), (15)) обеспечивает малость правой части (39). Построенная с помощью (16), (24), (34), (38) пунктирная кривая $f_N \sigma^{-2} \varphi_2$ адекватно приближает отклонение Δ_1 первого приближения $f_N(1 + \sigma^{-1} \varphi_1)$ от $f(\xi, \tau)$ (рис. 3).

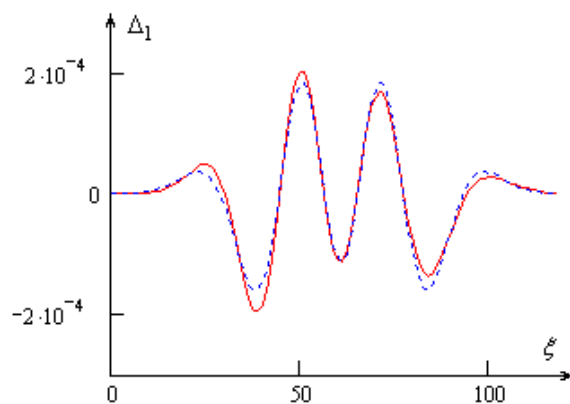


Рис. 3. Отклонение $f(\xi, 60)$ от своего первого приближения (сплошная кривая) и вклад в него эксцесса (пунктир)

Описанная итерационная процедура позволяет последовательно определить все $\varphi_n(x)$ до какого угодно номера. Ее недостатком является некоторая идеологическая непоследовательность. Развивая теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности, следует обойтись без решения дифференциальных уравнений (25). Тем более что знание всех моментов случайной величины (а они нами уже определены (см. (7))) эквивалентно знанию ее функции распределения. То есть $\varphi_n(x)$ с любым номером должна определяться с помощью центральных моментов ξ без развития итерационной процедуры. Покажем, как это делается. Фигурирующие в (27) коэффициенты c_{nk} подберем так, чтобы выполнялись тождества:

$$\frac{\mu_i(\tau)}{\sigma(\tau)^i} \equiv \int_0^\infty \left(\frac{\xi - m(\tau)}{\sigma(\tau)} \right)^i f(\xi, \tau) d\xi, \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots), \tag{40}$$

в левой части которых фигурируют найденные ранее центральные моменты ξ . Подставив (13), (16), (24) в (40) и выполнив замену переменной (19), получим

$$\frac{\mu_i(\tau)}{\sigma(\tau)^i} \equiv \int_{\frac{m(\tau)}{\sigma(\tau)}}^\infty x^i \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_n(x)}{\sigma^n(\tau)} \right) dx. \tag{41}$$

Тождество (41) должно выполняться в любой, в том числе и в бесконечно удаленный момент времени, удобный для вычисления фигурирующих в (41) несобственных интегралов. При этом на нижнем пределе возникает $-\infty$, так как математическое ожидание $m(\tau)$ координаты элементарного акта сорбции растет со временем быстрее ее среднеквадратического отклонения $\sigma(\tau)$ (см. (10), (11)).

С учетом этого обстоятельства (41) примет вид

$$\frac{\mu_i(\tau)}{\sigma(\tau)^i} \equiv \int_{-\infty}^\infty x^i \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_n(x)}{\sigma^n(\tau)} \right) dx. \tag{42}$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях $\sigma(\tau)$ в левой и правой частях (42), будем для четных i получать по одному уравнению относительно всех $\varphi_n(x)$ с четными номерами, а при нечетных i – по одному уравнению относительно всех $\varphi_n(x)$ с нечетными номерами. Меняя i , можно для любой $\varphi_n(x)$ записать нужное количество уравнений, достаточное для определения ее коэффициентов. Иными словами, соотношение (42) позволяет вычислять $\varphi_n(x)$ с любым номером, не пользуясь итерационной процедурой. Например, минуя вычисление $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$, найдем сразу $\varphi_3(x)$ (см. (27)):

$$\varphi_3(x) = c_{31}x + c_{33}x^3 + c_{35}x^5 + c_{37}x^7 + c_{39}x^9. \quad (43)$$

Интегралы в правой части (42) при коэффициентах c_{3k} будут отличны от нуля для нечетных i . С учетом вида правой части (43) нам потребуется пять линейно независимых уравнений (42) с нечетными номерами ($I = 1, 3, 5, 7, 9$). При этом в левой части (42) удобно выделить явную зависимость центральных моментов от $\sigma(\tau)$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\mu_1(\tau)}{\sigma(\tau)^1} &= 0, \\ \frac{\mu_3(\tau)}{\sigma(\tau)^3} &= \frac{3}{\sigma(\tau)} - \frac{1}{\sigma(\tau)^3}, \\ \frac{\mu_5(\tau)}{\sigma(\tau)^5} &= \frac{30}{\sigma(\tau)} + \frac{50}{\sigma(\tau)^3} - \frac{36}{\sigma(\tau)^5}, \\ \frac{\mu_7(\tau)}{\sigma(\tau)^7} &= \frac{315}{\sigma(\tau)} + \frac{2415}{\sigma(\tau)^3} + \frac{714}{\sigma(\tau)^5} - \frac{1590}{\sigma(\tau)^7}, \\ \frac{\mu_9(\tau)}{\sigma(\tau)^9} &= \frac{3780}{\sigma(\tau)} + \frac{74340}{\sigma(\tau)^3} + \frac{213192}{\sigma(\tau)^5} - \frac{63792}{\sigma(\tau)^7} - \frac{94024}{\sigma(\tau)^9}. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Приравняв в упомянутых пяти уравнениях коэффициенты при $\sigma(\tau)^{-3}$ слева и справа, получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^1 e^{-\frac{x^2}{2}} \varphi_3(x) dx &= 0, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^3 e^{-\frac{x^2}{2}} \varphi_3(x) dx &= -1, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^5 e^{-\frac{x^2}{2}} \varphi_3(x) dx &= 50, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^7 e^{-\frac{x^2}{2}} \varphi_3(x) dx &= 2415, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^9 e^{-\frac{x^2}{2}} \varphi_3(x) dx &= 74340. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Подставив в (45) разложение (43) и выполнив интегрирование по x , получим записанную в матричной форме систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов $c_{3, 2k+1}$, ($k = 0, 1, \dots, 4$)

$$A^{(5)} \cdot \begin{pmatrix} c_{31} \\ c_{33} \\ c_{35} \\ c_{37} \\ c_{39} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 50 \\ 2415 \\ 74340 \end{pmatrix}, \quad (46)$$

где

$$A^{(n)} = \begin{pmatrix} I_1 & \cdot & \cdot & I_n \\ I_2 & \cdot & \cdot & I_{n+1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ I_n & \cdot & \cdot & I_{2n-1} \end{pmatrix}, \quad (47)$$

$$a \quad I_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^{2m} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2m-1), \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (48)$$

Единственным решением (46) является набор чисел:

$$c_{31} = \frac{23}{16}, \quad c_{33} = -\frac{31}{6}, \quad c_{35} = \frac{25}{8}, \quad c_{37} = -\frac{1}{2}, \quad c_{39} = \frac{1}{48}. \quad (49)$$

Подчеркнем, что система для их получения оказалась определенной и при этом мы никак не пользовались информацией о $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$. В качестве проверки можно подставить (43), (49) в третье уравнение (25) и с помощью (34), (38) непосредственно убедиться, что найденная $\varphi_3(x)$ обращает его в тождество. Аналогично определяются коэффициенты полинома $\varphi_4(x)$. В этом случае интегралы (42) при соответствующих коэффициентах будут отличны от нуля для четных i . Потребуется зависимость от σ семи центральных моментов $\mu_i(\tau)$ с четными номерами ($i = 0, 2, 4, \dots, 12$) и приравнивая будем коэффициенты при σ^4 в левой и правой частях (42). В результате получим

$$\varphi_4(x) = \frac{49}{128} - \frac{279}{64}x^2 + \frac{1373}{128}x^4 - \frac{653}{96}x^6 + \frac{183}{128}x^8 - \frac{7}{64}x^{10} + \frac{1}{384}x^{12}. \quad (50)$$

На рисунке 3 видно, как соответствующая поправка вписывается в отклонение функции распределения от своего приближенного выражения. Достижимая при этом относительная погрешность для рассматриваемого момента времени порядка 10^{-3} . Построенная с помощью (16), (24), (32), (34), (38), (43), (49), (50) зависимость сливается со сплошной кривой на рисунке 1. При этом временные затраты в актуальном диапазоне аргументов оказываются в $10^4 \dots 10^5$ раз меньше, чем при использовании формулы (3) с той же точностью. Таким образом, знание асимптотики $f(\xi, \tau)$ при больших временах многократно улучшает сходимость фигурирующих в (2), (3) двойных рядов.

В заключение осталось обсудить вопрос о максимальной степени полиномов $\varphi_n(x)$. Соотношения (27) были получены исходя из структуры уравнений (25). И эта информация использовалась при вычислении коэффициентов c_{nk} методом моментов, так как было заранее известно, сколько уравнений (42) потребуется для определения данной $\varphi_n(x)$. В принципе, без этой предварительной информации можно обойтись, опираясь только на алгебраические соображения. Например, при вычислении $\varphi_1(x)$ формально добавим к правой части (28) слагаемое более высокой степени, чем третья:

$$\varphi_1(x) = c_{11}x + c_{13}x^3 + c_{15}x^5. \quad (51)$$

Теперь для определения неизвестных коэффициентов потребуются три уравнения (42) с нечетными номерами. В их левые части попадут соответственно выражения из первой строчки (44). Приравняв слева и справа в упомянутых уравнениях коэффициенты при $\sigma(\tau)^{-1}$, вместо (46) получим

$$A^{(3)} \cdot \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{13} \\ c_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 30 \end{pmatrix}. \quad (52)$$

Выполнив с помощью (48) интегрирование по x , покажем линейную зависимость строк третьего вспомогательного определителя:

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 3 & 15 & 3 \\ 15 & 105 & 30 \end{vmatrix} = 3 \cdot 15 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 1 & 5 & 1 \\ 1 & 7 & 2 \end{vmatrix} = 3 \cdot 15 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 1 & 5 & 1 \\ 2 & 10 & 2 \end{vmatrix} = 3 \cdot 15 \cdot 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 1 & 5 & 1 \\ 1 & 5 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

То есть в соответствии с теоремой Крамера $c_{15} = 0$, и мы опять возвращаемся к выражению (28).

Поступила 14.01.2013

PROBABILITY-THEORETICAL APPROACH TO MODELING OF DYNAMIC SORPTION ACTIVITY

S. EKHILEVSKY, O. GOLUBEVA, D. PYATKIN

The full method of the moments has been realized, allowing to define the density of probability of a random variable (coordinates of the elementary action of sorption) through set of its initial moments. As a result of the analysis of dependence of these moments from time the kind asymptotic of slippage is received at big times. The error is estimated at replacement of the exact decision with its asymptotic expression. The found decisions allow to reduce time expenses in an actual range of arguments in $10^4 \dots 10^5$ times therefore speed of numerical experiments, as well as their possibilities, are deduced on qualitatively other level.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Достанко А.П., Томаль В.С., Касинский Н.К., Иванов И.А.</i> Методика расчета воспроизводимости оптической толщины вакуумных покрытий	2
<i>Данилов В.А.</i> Реализация функциональных связей в формообразующих системах станочного оборудования	6
<i>Голембиевский А.И.</i> Синхронизация приводов исполнительных органов зубофрезерного станка для обработки зубчатых колес с наклонными зубьями	15
<i>Иванов В.П., Кастрюк А.П.</i> Восстановление корпусных деталей автотракторных агрегатов	24
<i>Каиштальян И.А.</i> Влияние кинематической неустойчивости процесса резания на эксплуатационные характеристики станков с числовым программным управлением	31
<i>Котов С.Ю., Беляев Г.Я.</i> Влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения покрытием ZrN на долговечность подшипника	38
<i>Дорогокупец А.С., Вайтехович П.Е., Францкевич В.С.</i> Влияние технологических параметров динамического классификатора на аэродинамику и эффективность классификации измельченного продукта в среднеходной мельнице	44
<i>Михайлов М.И., Ланко О.А.</i> Влияние параметров торцевой фрезы на размеры срезаемого слоя и вид обработанной поверхности	52
<i>Седель О.Я.</i> Оптимизация параметров мощности дифференциального привода с учетом диапазона регулирования скорости ведомого звена	58
<i>Щерба В.Я.</i> Применение композиционных материалов на основе продуктов переработки нефтяных углеводородов для кондиционирования калийных удобрений	64
<i>Семенов В.И.</i> Удаление загрязнений, прочно связанных с поверхностями деталей	69
<i>Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С.</i> Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности	73
<i>Дашкевич В.Г., Пивоварчик А.А., Щербаков В.Г.</i> Фрикционная искробезопасность борсодержащих диффузионных и наплавленных покрытий	78
<i>Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Кизина О.А.</i> Нагрев и сушка пиломатериалов в макетном образце СВЧ-установки	82
<i>Анисимов В.В., Ермаков П.П., Петров О.А., Павлечко В.Н.</i> Особенности методики обработки экспериментальных данных изучения процесса кавитации с погруженным соплом	85

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Покровская С.В., Завадский А.В.</i> Влияние содержания ароматических углеводородов в бензине-растворителе, подаваемом на стадии очистки от механических примесей, на коллоидную стабильность высокощелочной сульфатной присадки в масле	89
<i>Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю., Гурков Г.Н., Соболевский А.А.</i> Улучшение экологических показателей работы дизеля при использовании альтернативного вида топлива на основе этанола	95
<i>Ермак А.А., Бородий И.А., Михайловский Е.В.</i> Перспективы использования гуминовых веществ торфа в качестве компонента присадок к дорожным битумам	101
<i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Попкова Л.А., Писарева С.С.</i> Сорбционные свойства природных целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов для сбора проливов нефтепродуктов	110
<i>Довыденкова В.П., Ольшанский В.И., Дмитракович Н.М., Мацкевич Е.В.</i> Закономерности распределения температуры на внутренней поверхности материала верха специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий	116
<i>Ехилевский С.Г., Ольшанников С.А.</i> Повышение эффективности дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде	123
<i>Чеботарев П.А.</i> Характеристика загрязнения атмосферного воздуха городов Новополюцка и Полоцка в динамике за 1980 – 2000 годы	131
<i>Юсра Мохаммед Квиджа Аль-Далеми</i> Оценка профессионального риска на нефтехимическом предприятии	135
<i>Чеботарев П.А.</i> Эколого-гигиеническая оценка осадка сточных вод после биологических прудов на нефтеперерабатывающем предприятии	141
<i>Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Пяткин Д.В.</i> Теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности	144