

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 ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

---

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

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

---

---

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

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

---

---

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

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

Подписано к печати 27.02.2017. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 16,97. Уч.-изд. л. 20,46. Тираж 100 экз. Заказ 770.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9

### ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

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

*Способ формообразующей обработки рассматривается с позиций общей теории систем как целенаправленный, целостный объект реальной действительности, наделенный вполне определенной структурой и функцией. Структура способа обработки представлена как множество целесообразно связанных приемов (действий), их последовательности и правил выполнения, а функция как процесс формообразования поверхности на заготовке. Выявлено, что целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения отдельных приемов приводит к качественно иному способу обработки с новой структурой и функцией, обеспечивающему достижение иной производной цели. Это следствие, как показывает анализ патентных источников, целенаправленно используется при поиске новых способов формообразующей обработки, производных от известных технических решений.*

**Ключевые слова:** *способ формообразующей обработки, следствие из определения способа обработки, зуборезный долбяк, обкатной резец, зубодолбление, зуботочение, точение червяков.*

**Введение.** В нормативной литературе по научно-технической экспертизе изобретений [1] периода интенсивного развития изобретательства в СССР способ определяется как процесс выполнения взаимосвязанных действий, необходимых для достижения поставленной цели. Это определение недостаточно полно отображало практику патентной защиты изобретений, поэтому на примере формообразующей обработки в машиностроении в работе [2] на основе анализа формул изобретения произвольного многообразия способов конкретизировано нормативное определение такого способа обработки.

*Способ формообразующей обработки* – это целенаправленная совокупность приемов воздействия посредством объекта как инструмента на твердое тело, выполняемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил, например, в течение некоторого времени, при определенном соотношении воздействий приемов, определенной температуре, определенном состоянии среды, в которой происходит процесс, и т. д.

Это определение с позиций общей теории систем характеризует любой способ формообразующей обработки (S-систему) *со стороны целостности* как относительно обособленный объект (виртуальное техническое решение) из совокупности всех известных и возможных новых способов, объединенных общей пионерной или первообразной целью; *со стороны функции* – как процесс формообразования поверхностей, то есть как процесс качественного изменения твердого тела (заготовки); *со стороны структуры* – как множество целесообразно связанных приемов, их последовательности и правил выполнения [3].

Приведенное определение способа формообразующей обработки, сформулированное в 1986 году, адекватно действующему в настоящее время правовому акту в области патентования [4].

**Основная часть.** Из определения понятия способа формообразующей обработки и его представления в форме системного объекта (S-системы) следует, что целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения отдельных приемов приводит к качественно иному способу обработки с новой структурой и функцией, обеспечивающему достижение иной производной цели. При этом структурные изменения могут охватывать как отдельные приемы, так и существенно преобразовывать структуру и функцию способа, что влечет за собой появление новых способов, в том числе подлежащих правовой защите. Это следствие, как показывает анализ патентных и библиографических источников, целенаправленно используется при поиске новых способов формообразующей обработки, производных от известных, в том числе пионерных технических решений.

Рассмотрим пионерный способ обкатного зубодолбления цилиндрических прямозубых колес, разработанный в начале 20-го столетия (фирма «Феллоу», США). По этому способу [5] при воспроизведении профиля зубчатой поверхности согласованные вращательные движения зуборезного долбяка, выполненного в виде зубчатого колеса, и нарезаемой заготовки имитируют зацепление зубчатой передачи.

По пионерному способу обкатного зубодолбления (рис. 1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости А–А, совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получе-

ния зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$  долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двухэлементарным движением обката  $\Phi_s(B_2B_3)$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_2$  долбяка и вращения  $B_3$  заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными формообразующими движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение  $Vp(\Pi_4)$  радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку сообщается движение  $Vc(\Pi_5)$  «отскока», предназначенное для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе в движении  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$  с целью устранения явления затирания, проявляющегося в виде скольжения зубьев долбяка о зубья профилируемого колеса.

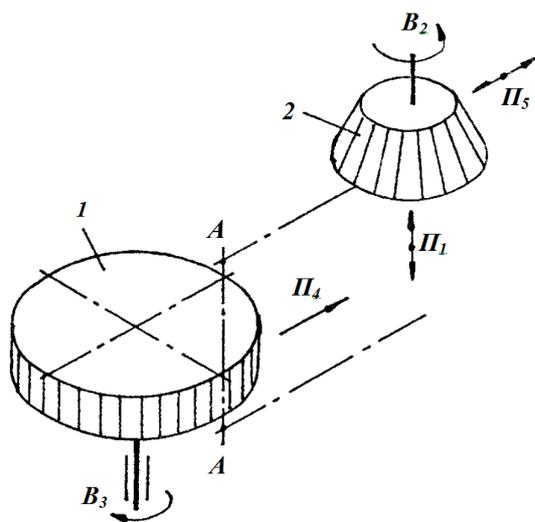
Формообразующее движение  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$  имеет незамкнутую траекторию и настраивается по трем параметрам: на скорость – изменением числа двойных ходов в минуту долбяка 2, на путь и исходную точку – по упорам в движении  $\Pi_1$  долбяка. Формообразующее движение  $\Phi_s(B_2B_3)$  имеет замкнутую траекторию. Это движение настраивается также по трем параметрам: на траекторию – согласованием движений  $B_2$  долбяка и  $B_3$  заготовки; на скорость – изменением круговой подачи долбяка в движении  $B_2$ , задаваемой величиной дуги начальной окружности долбяка за один его двойной ход; на направление – изменением направления траектории движения обката. При этом согласование движений  $B_2$  и  $B_3$  осуществляют на основе следующих расчетных перемещений:

$$1 \text{ оборот долбяка } (B_2) \rightarrow z_u/z \text{ оборота нарезаемого колеса } (B_3),$$

или

$$1/z_u \text{ оборота долбяка } (B_2) \rightarrow 1/z \text{ оборота нарезаемого колеса } (B_3),$$

где  $z_u$  и  $z$  – число зубьев долбяка и нарезаемого колеса соответственно.



**Рисунок 1. – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес при радиальном врезании долбяка**

Движение врезания  $Vp(\Pi_4)$  настраивается на скорость (подачу) в движении  $\Pi_4$ , задаваемую относительно одного двойного хода долбяка, путь и исходную точку по упорам.

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью приемов, т. е. целенаправленных действий (движений), совершаемых заготовкой и долбяком для достижения первообразной цели – получение прямозубого колеса внешнего зацепления. Наряду с приемами целенаправленных действий в качестве признаков способа выступают последовательность приемов и правила выполнения отдельных приемов – определенность установки заготовки относительно направления движения врезания и существенно меньшей скорости движения врезания и скорости обката (круговой подачи) по сравнению со скоростью резания. Таким образом, с позиций общей теории систем *пионерный способ зубодолбления* – это законченный целостный объект реальной действительности. Его синергизм на период создания – существенное повышение производительности и кинематической точности зубчатых колес [6].

Позже (фирма «Сайкс», Великобритания), с целью долбления косозубых цилиндрических колес, в схеме рассмотренного пионерного способа элементарное поступательно-возвратное движение  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$  было преобразовано в двухэлементарное возвратно-винтовое движение  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1 \uparrow B_6)$ , где  $\uparrow B_6$  – дополнительное вращательно-возвратное движение долбяка (на рисунке 1 не показано). Полученный таким образом способ долбления косозубых цилиндрических колес с радиальным врезанием отличается от пионерного дополнительным элементом (движением  $\uparrow B_6$ ) и правилом его выполнения (функциональной связью с движением  $\uparrow\Pi_1$ ). Согласование движений  $\uparrow\Pi_1$  и  $\uparrow B_6$  обеспечивает настройку параметра траектория при воспроизведении винтовой образующей – линии зуба косозубого колеса. Формулу настройки этого параметра вычисляют на основе следующих расчетных перемещений:

$$1 \text{ двойной ход долбяка } (\uparrow\Pi_1) \rightarrow \pi m_n z_u / \sin\beta (\uparrow B_6),$$

где  $m_n$  – нормальный модуль;  $\beta$  – угол подъема зубьев долбяка и нарезаемого колеса.

Таким образом, способ долбления косозубых цилиндрических колес, производный от пионерного, получен на основе использования следствия, приведенного выше. Названное следствие использовано также при разработке способа зубодолбления колес с линией зуба на делительном конусе [7]. По этому способу

зубодолбления долбяку сообщают дополнительное равномерное движение  $\Pi_7$  (на рисунке 1 не показано) в направлении его «отскока» в движении  $\Pi_5$ , которое синхронизируют с поступательно-возвратным движением  $\Pi_1$ . Параметр «путь дополнительного движения» устанавливают по зависимости

$$h = H \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $h$  – путь дополнительного движения, мм;  $H$  – путь поступательно-возвратного движения долбяка, мм;  $\varphi$  – угол наклона зуба обрабатываемого колеса.

В первоисточнике [7] при реализации данного способа в кинематической структуре станка путь дополнительного движения  $\Pi_7$  совмещен с параметром «путь движения “отскока”  $\Pi_5$ » на одном исполнительном органе – жестком программоносителе (кулачке), управляющем вспомогательным движением  $B_5(\Pi_5)$ .

Пионерный способ зубодолбления является также прототипом для способа обработки зубчатых колес внутреннего зацепления. В этом способе элементарные движения, образующие сложное движение обката  $\Phi_s(B_2B_3)$ , вращаются в одну и ту же сторону.

Анализ патентных источников показывает, что большинство способов обкатного зубодолбления разработано в разное время с использованием следствия, вытекающего из определения понятия способа формообразующей обработки. В настоящее время на поле ветвящихся путей целенаправленного развития способов обкатного зубодолбления, вероятно, наибольший практической интерес представляют производные от пионерного – способ зубодолбления с тангенциальным врезанием [8] и способ зубодолбления со спиральным врезанием [9].

При обкатном зубодолщении зуборезными долбяками срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow \Pi_1$  (см. рис. 1) скорости резания. Вместе с тем движение обката  $B_2B_3$ , скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме. Это неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу в движении  $\Pi_5$  приводит к возникновению явления затирания, которое проявляется в виде трения скольжения боковых режущих кромок зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса. Природа этого явления рассмотрена в работе [10].

Среди технических решений, обеспечивающих устранение явления затирания, предпочтительны решения, основанные на согласовании ритмов формообразующих движений. Для решения этой задачи возможны два пути согласования ритмов этих движений. Первый путь – приведение ритма движения обката, воспроизводящего направляющую (профиль зубьев), к ритму движения скорости резания, воспроизводящей образующую (линию зуба).

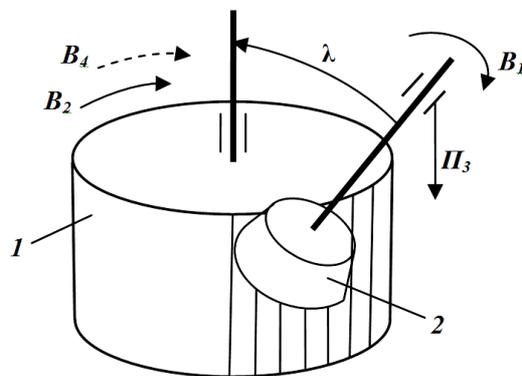


Рисунок 2. – Способ зуботочения цилиндрических прямозубых колес

Следовательно, необходимо на периоды холостого хода долбяка прекращать движение обката. Такой вариант, признанный изобретением [11], посредством изменения правила выполнения одного из формообразующих движений обеспечивает устранение явления затирания при зубодолщении. Второй путь основан на приведении ритма движения скорости резания к ритму движения обката. В этом случае оба формообразующих движения осуществляются непрерывно. Полученный таким образом процесс обработки был назван зуботочением (рис. 2), а режущий инструмент – обкатным резцом типа долбяка.

Первые технические решения в области зуботочения (способы обработки и соответствующее станочное оборудование) были защищены шестью патентами в США в 1921–1929 годах [12]. В приведенном первоисточнике краткое описание способа зуботочения повторяет его описание по первому патенту. Такое описание не соответствует современной парадигме, принятой в настоящее время

в станковедении. Не рассматривается также условие, при котором возможно зуботочение обкатным резцом типа долбяка при воспроизведении профиля зубьев обкатом (по описанию изобретения по патентам – огибанием).

При рассмотрении зацепления двух цилиндрических колес с винтовыми зубьями, работающими с перекрещивающимися осями, наблюдается скольжение боковой поверхности зубьев одного колеса относительно другого. Одно из двух сцепляющихся колес заменим обкатным резцом типа зуборезного долбяка, а другое – заготовкой. При сообщении инструменту и заготовке согласованных вращательных движений, имитирующих зацепление зубчатой передачи, скольжение боковой поверхности зубьев инструмента преобразуется в резание (точение). При этом прямозубые колеса необходимо нарезать обязательно косозубым инструментом, так как только в этом случае угол скрещивания осей не будет равен

нулю. Косозубые колеса можно нарезать как прямозубым, так и косозубым инструментом. При названных условиях скорость резания определяется относительным скольжением боковых поверхностей зубьев и зависит от суммы углов подъема зубьев инструмента, зубьев нарезаемого колеса и угла скрещивания осей инструмента и нарезаемой заготовки. По библиографическим источникам, наивыгоднейшая сумма этих углов равна 90 градусов. При этом угол скрещивания осей обычно принимают равным 60 градусам.

При зуботочении прямозубого колеса (см. рис. 2) заготовка 1 относительно инструмента 2 устанавливается так, чтобы их оси скрещивались под углом  $\lambda$ . Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения инструменту и заготовке двух формообразующих движений. Профиль зубьев (образующая) зубчатого колеса и процесс деления, совмещенный с формообразованием, воспроизводится двухэлементарным движением обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_1$  инструмента 2 и вращения  $B_2$  заготовки 1. Движение обката с замкнутой траекторией. Настраивается это движение по трем параметрам: на траекторию – согласованием движений  $B_1$  и  $B_2$ ; на скорость – изменением круговой частоты движения  $B_1$ ; на направление – изменением направления траектории обката. Функциональная связь движений  $B_1$  и  $B_2$  осуществляется на основе расчетных перемещений, аналогичных приведенным выше для движения обката при зубодолблении.

Линия зуба (направляющая) – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением  $\Phi_s(P_3)$  инструмента. Это движение с незамкнутой траекторией и настраивается на скорость изменением величины подачи, на путь и исходное положение – по упорам.

Способ зуботочения цилиндрических прямозубых колес, как и его прототип по рисунку 1, характеризуется вполне определенной совокупностью целенаправленных действий (движений), совершаемых заготовкой и долбяком, последовательностью и правилами выполнения этих действий. Как законченный целостный объект реальной действительности способ зуботочения обеспечивает достижение первообразной цели – получение прямозубого колеса внешнего зацепления.

Для зуботочения косозубых колес (производная цель) в схеме рассмотренного способа зуботочения прямозубых колес (см. рис. 2) элементарное движение  $\Phi_s(P_3)$  необходимо преобразовать в двухэлементарное винтовое движение  $\Phi_s(P_3B_4)$ , где  $B_4$  – дополнительное вращательное движение заготовки (на рисунке 2 показано пунктирной стрелкой). Полученный таким образом способ зуботочения косозубых цилиндрических колес отличается от прототипа (первообразного способа) дополнительным элементом (движением  $B_4$ ) и правилом его выполнения, определяемым через функциональную связь с движением  $P_3$ . При этом функциональная связь движений  $P_3$  и  $B_4$  осуществляется по расчетным перемещениям:

$$\pi t_n z_u / \sin \beta \text{ поступательного перемещения обкатного резца } (P_3) \rightarrow 1 \text{ оборот обкатного резца } (B_4).$$

При зуботочении косозубых колес заготовка 1 одновременно участвует в движениях  $B_2$  и  $B_4$ . Возможно как физическое, так и математическое суммирование двух элементарных движений на одном исполнительном органе. При физическом сложении в кинематической структуре станка обязательно наличие дифференциала (суммирующего механизма). Этот вид сложения используется в выпускаемых станках для зуботочения (например, в станках моделей ЕЗ-13, ЕЗ-24 и др.).

Синергизм обоих рассмотренных способов зуботочения характеризуется производными целями: изменением функции формообразующих движений; на этой основе упрощением структуры посредством исключения движений врезания и «отскока» инструмента, характерного для зубодолбления; отсутствием явления затирания инструмента; повышением производительности. По библиографическим источникам, производительность зуботочения выше производительности обкатного зубодолбления и зубофрезерования червячными фрезами в 3–4 раза. Недостатки зуботочения – невозможность нарезания меньшего колеса в блоке зубчатых колес, зубчатых реек и зубчатых секторов.

Обкатной резец типа зуборезного долбяка можно использовать также при точении различных червяков. Для этого в червячной передаче необходимо червячное колесо заменить обкатным резцом типа зуборезного долбяка, а червяк – заготовкой. На рисунке 3 приведена схема взаимодействия инструмента 1 (обкатного резца типа зуборезного долбяка) и заготовки 2 обрабатываемого цилиндрического (архимедова) червяка. Для реализации рассматриваемого способа точения необходимо обкатной резец 1 в виде зубчатого колеса с профилем зуба, форма которого является сопряженной при обкате с профилем резьбы нарезаемого червяка, катить без скольжения относительно обрабатываемой заготовки 2. В этом случае характеристический образ каждого зуба инструмента соответствует характеристическому образу зубьев зуборезного долбяка.

При обработке профиль витка – образующая винтовой поверхности червяка – воспроизводится сложным двухэлементарным движением обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , состоящим из согласованных элементарных вращательных движений  $B_1$  инструмента 1 и  $B_2$  заготовки 2. Это движение имитирует зацепление червячной передачи, имеет замкнутую траекторию и настраивается по трем параметрам: на траекторию – согласованием движений  $B_1$  и  $B_2$ ; на скорость – изменением круговой частоты движения  $B_1$ ; на направление – изменением направления траектории обката.

Линия витка – винтовая направляющая винтовой поверхности червяка – воспроизводится сложным двухэлементарным винтовым движением  $\Phi_s(B_3\Pi_4)$ , состоящим из согласованных элементарных движений – вращательного движения  $B_3$  заготовки и поступательного движения  $\Pi_4$  инструмента. Винтовое движение имитирует зацепление передачи «винт – гайка». Это движение имеет незамкнутую траекторию. Поэтому настраивается по пяти параметрам:

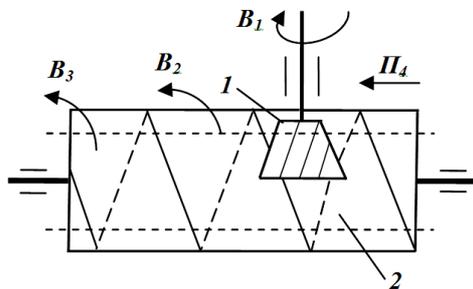


Рисунок 3. – Способ точения цилиндрических (архимедовых) червяков

Вывод формул настройки траекторий формообразующих движений осуществляют по следующим расчетным перемещениям:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_2) \rightarrow k/z \text{ поворота обкатного резца } (B_1);$$

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_3) \rightarrow kT \text{ мм перемещения обкатного резца } (\Pi_4),$$

где  $k$  – количество заходов обрабатываемого червяка;  $z$  – количество зубьев обкатного резца;  $T$  – шаг обрабатываемого червяка.

В рассматриваемом способе точения червяков заготовка 2 одновременно участвует в движениях  $B_2$  и  $B_3$ , находящихся в жесткой функциональной связи, задаваемой приведенными расчетными перемещениями, с движениями  $B_1$  и  $\Pi_4$ . В известных специализированных станках моделей ЕЗ-10, ЕЗ-10А и др., реализующих данный способ точения червяков, движения  $B_2$  и  $B_3$  суммируются физически посредством планетарного суммирующего механизма. Такой механизм не нужен при математическом сложении указанных движений. Однако осуществимость такого сложения возможна только при условии, что слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова и создаются они одним источником движения. В этом случае двухэлементарное движение обката преобразуется к виду  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$ , а двухэлементарное винтовое движение  $\Phi_s(B_3\Pi_4)$  преобразуется в элементарное  $\Phi_s(\Pi_4)$ . При этом изменяются расчетные перемещения для вывода формулы настройки на траекторию движения обката и исключается вывод формулы настройки для согласования движений  $B_3$  и  $\Pi_4$ . Этот тезис обосновывается следующим образом. При нарезании червяка за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) обкатной резец совершает  $k/z$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  (движение  $\Pi_4$ ). Для получения винтовой линии червяка при перемещении обкатного резца на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_3$ ), что соответствует дополнительному повороту резца на величину  $+(k/z) \cdot (s/T)$ . Следовательно, расчетные перемещения для согласования элементарных движений, образующих движение обката  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$ , будут иметь вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2 + B_3) \rightarrow k/z(1 + s/T) \text{ оборота обкатного резца } (B_1).$$

Как законченный целостный объект данный способ обеспечивает достижение первообразной цели – получение цилиндрического червяка. Причем процесс обработки осуществляется, как правило, за один проход. Синергизм способа заключается в существенном повышении производительности по сравнению с первообразным способом многопроходного точения червяков не менее чем тремя последовательно используемыми токарными резцами.

Известен [13] двухшаговый червяк, отличающийся от традиционного архимедова червяка тем, что его начальная винтовая линия витка расположена на конической поверхности. При этом шаг витка червяка по противоположным сторонам его профиля зависит от угла  $\varepsilon$  расположения начальной винтовой линии витка:

$$t_{\sigma, m} = \pi m (\cos \alpha_0 / \cos (\alpha_0 \pm \varepsilon)),$$

где  $t_{\sigma, m}$  – соответственно больший и меньший шаги витка;  $\alpha_0$  – угол зацепления;  $\varepsilon$  – угол наклона образующей начальной поверхности; «+» и «-» – относятся соответственно к большему и меньшему шагам.

Угол  $\varepsilon$  определяется из выражения:

$$\varepsilon = \arctg (\Delta / 2 \operatorname{tg} \alpha_0),$$

где  $\Delta$  – коэффициент приращения шага,  $\Delta = a\pi m / l_p$ . Здесь  $a$  – коэффициент допустимого износа;  $l_p$  – дополнительная длина червяка.

Коэффициент  $a$  допустимого износа зависит от знаменателя стандартного ряда модулей. При знаменателе ряда, равном 1,06, коэффициент  $a = 0,03$ . Дополнительная длина  $lp$  является конструктивным признаком двухшаговых червяков. Для станочных делительных передач  $lp = 10 \dots 15$  мм.

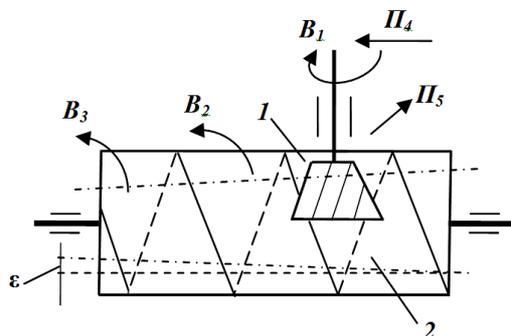


Рисунок 4. – Способ точения цилиндрических двухшаговых червяков

Двухшаговый червяк с начальной винтовой линией витка на конической поверхности в зацеплении с традиционным одношаговым червячным колесом образует червячную передачу [14], в которой при осевом смещении червяка осуществляется регулирование бокового зазора.

Используя рассмотренный выше способ точения цилиндрических червяков по рисунку 3, в качестве прототипа разработаем способ точения двухшаговых червяков с начальной винтовой линией витка на конической поверхности. Решение этой задачи (рис. 4) сводится к изменению траектории формообразующего движения, воспроизводящего винтовую направляющую винтовой поверхности витка червяка 2. Для этого необходимо обкатному резцу 1 сообщить дополнительно движение  $P_5$  перпендикулярно движению  $P_4$  и установить функциональную связь между этими движениями.

В итоге известное по прототипу сложное двухэлементарное движение  $\Phi_3(B_3P_4)$  преобразуется в трехэлементарное  $\Phi_3(B_3P_4P_5)$ . При этом функциональную связь между движениями  $P_4$  и  $P_5$  устанавливают по следующим расчетным перемещениям:

$$L \text{ мм перемещения обкатного резца } (P_4) \rightarrow l \text{ мм перемещения обкатного резца } (P_5),$$

где  $L$  – параметр «путь обкатного резца в движении  $P_4$ »;  $l = L \operatorname{tg} \varepsilon$ ;  $\varepsilon$  – угол наклона начальной винтовой линии червяка.

Профиль витка – образующая винтовой поверхности двухшагового червяка – воспроизводится, как и в способе-прототипе, сложным двухэлементарным движением обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ .

В процессе обработки, выполняем, как правило, за один проход, заготовка 2 одновременно участвует в движениях  $B_2$  и  $B_3$ . При математическом сложении этих движений двухэлементарное движение обката, воспроизводящее профиль витка червяка, преобразуется к виду  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$ , а трехэлементарное движение, воспроизводящее винтовую линию витка, преобразуется к виду  $\Phi_s(P_4P_5)$ . При этом изменяются расчетные перемещения для вывода формулы настройки на траекторию движения обката и исключается вывод формулы настройки для согласования движений  $B_3$  и  $P_4$ .

Таким образом, как законченный целостный объект данный способ обеспечивает достижение производной цели (получение цилиндрического двухшагового червяка с линией витка на конической поверхности) при сохранении синергизма способа-прототипа.

Возвращаясь к следствию из понятия способа формообразующей обработки, заметим, что целенаправленное включение в структуру способа-прототипа дополнительного приема (движение  $P_5$ ) и задание правила выполнения этого приема посредством его функциональной связи с известным по прототипу приемом (движение  $P_4$ ) привели к качественно иному способу точения червяков с новой структурой и функцией, обеспечивающей достижение производной цели. Данный способ формообразующей обработки, вероятно, мог быть признан изобретением при подаче соответствующей заявки до его опубликования в открытой печати [15].

**Заключение.** Предложена частная методика создания новых способов формообразующей обработки (виртуальных технических решений). В основу методики положено следствие, вытекающее из легального определения понятия способа формообразующей обработки. По этому следствию целенаправленное изменение совокупности приемов способа-прототипа или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения отдельных приемов приводят к качественно иному способу обработки, в том числе подлежащему правовой защите, с новой структурой и функцией, и обеспечивающему достижение иной производной цели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по государственной научно-технической экспертизе изобретений ЭЗ-2-74 // Вопросы изобретательства. – 1974. – № 8. – С. 29–65.
2. Голембиевский, А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Минск : Наука и техника, 1986.

3. Голембиевский, А.И. Анализ способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 139–146.
4. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2003. – № 83. – С. 39.
5. Гир-Шепер, Ф. Зубодолбежный станок / Ф. Гир-Шепер. – М., 1914.
6. Голембиевский, А.И. Синергетическая модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 17–22.
7. Способ долбления зубчатых колес и станок для его осуществления : пат. ВУ 3343 / А.И. Голембиевский [и др.]. – Оpubл. 20.12.1999.
8. Способ нарезания цилиндрических колес : пат. SU 475761 / М. Тиксье. – Оpubл. 1975.
9. Способ обработки зубчатых колес : а. с. SU 1763112 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1992.
10. Голембиевский, А.И. Целенаправленная эволюция открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 8–15.
11. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес : а. с. SU 698732 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1979.
12. Мальков, О.В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием [Электронный ресурс] / О.В. Мальков // Инженерное образование. – 2016. – № 4. – С. 10.
13. Двухшаговый червяк : пат. RU 2020326 / А.И. Голембиевский, В.А. Петров. – Оpubл. 1994.
14. Червячная передача : пат. RU 2044194 / А.И. Голембиевский, В.А. Петров. – Оpubл. 1995.
15. Голембиевский, А.И. Модернизация кинематической структуры станка для обработки червяков чашечным резцом / А.И. Голембиевский // Техника машиностроения. – М., 2014. – Т. 21, вып. 2(86). – С. 15–20.

Поступила 10.01.2017

## METHODS OF THE WAYS FORMING MACHINING IN MECHANICAL ENGINEERING

A. GOLEMBIEVSKI

*Forming machining is regarded as a targeted, holistic object of reality, endowed with a well-defined structure and function. The structure of the processing method is considered as a set of related expedient methods (actions), their consistency and compliance with the rules, and function as a process of formation in a surface on the work piece. It is noted that purposeful change the set of methods or sequence of their execution, changing the rules of the implementation of certain techniques leads to a qualitatively different way machining the new structure and the function of ensuring the achievement of other objectives of the derivative. This is a consequence, as the analysis of patent sources specifically used in the search for new ways of forming machining, derived from the prior art.*

**Keywords:** way of forming machining, a consequence of the definition of a way of forming machining, gear-cutting ram, flow forming cutter, gear shaping, skiving, turning worms.

УДК 621.9.06

## ШЕРОХОВАТОСТЬ И ВОЛНИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ НА ДВУХСУПОРТНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*д-р техн. наук, проф. И.А. КАШТАЛЬЯН; Б. ОРУКАРИ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача повышения производительности двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением путем оптимального совмещения различных технологических переходов. Приведены результаты экспериментальных исследований шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин, обработанных двумя резцами совместно с включением в процесс резания кинематической неустойчивости.

**Ключевые слова:** поверхности деталей, шероховатость, волнистость, двухсуппортные токарные станки с числовым программным управлением.

Современный этап развития машиностроения характеризуется широким использованием станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако оборудование такого типа достаточно сложное, требующее теоретических знаний и практических навыков, а его приобретение связано с большими финансовыми затратами. В связи с этим проблема эффективного использования станков с ЧПУ является приоритетной для большинства предприятий машиностроения. Для токарных станков с ЧПУ, оснащенных двумя суппортами, резервы повышения эффективности находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Причем число вариантов совмещения может существенно возрасти, если на станке будет реализована функция независимого управления суппортами. В качестве критерия для автоматизированного выбора оптимального варианта совмещения может быть принята продолжительность цикла обработки заготовки, а в качестве ограничений стойкость режущего инструмента и параметры качества (точность размеров и формы обработанной поверхности, ее шероховатость и волнистость). Наибольший интерес при этом представляют математические зависимости (ограничения), устанавливающие взаимосвязь режимов резания с параметрами качества той поверхности детали, которая обработана двумя резцами совместно.

**Основная часть.** Функционирование станка, оснащенного микропроцессорным устройством ЧПУ, осуществляется путем отработки определенного набора алгоритмов управления. Причем кроме традиционных алгоритмов (интерполяции, расчета эквидистанты, разгона-замедления, коррекции режущего инструмента и др.), в этот набор может быть включен алгоритм независимого управления координатными перемещениями. Такой алгоритм был разработан и реализован на двухсуппортном токарном станке с ЧПУ мод. 1А751Ф3 [1]. По данному алгоритму согласование начала отработки обеих управляющих программ (для правого и левого суппортов) осуществляется с помощью признака синхронизации «Н». В управляющей программе (УП) для правого (левого) суппортов под адресом «Н» задается номер кадра, с которого начинается отработка УП для левого (правого) суппорта. Данная функция управления позволяет обеспечить оптимальное сочетание рабочих и вспомогательных ходов для правого и левого суппортов при их совместной работе.

Наибольший эффект от совместной работы двумя суппортами станка с ЧПУ может быть получен при изготовлении жестких деталей (кроме увеличения производительности обработки значительно повышается точность формы детали в продольном сечении). Эффект повышения точности обработки обеспечивается за счет уравнивания радиальных сил резания  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ . Настройку резцов для точения двумя резцами осуществляют по одной из известных схем [2]: с делением глубины резания (рис. 1); с делением подачи (рис. 2).

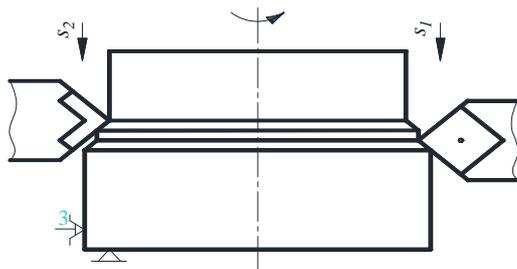


Рисунок 1. – Схема точения с делением глубины резания

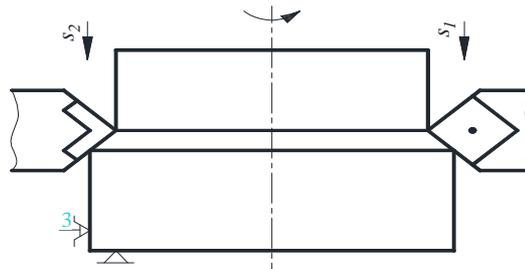


Рисунок 2. – Схема точения с делением подачи

При настройке по первой схеме (с делением глубины резания) требования к точности расположения вершины резца, удаляющего верхний слой припуска по отношению к оси вращения заготовки, невысоки. Фактически точность получаемого при обработке заготовки размера обеспечивается настройкой второго резца. Настроить резцы для точения с делением подачи значительно труднее, поскольку главные режущие кромки резцов должны располагаться на одном конусе, соосном обрабатываемой поверхности, а их вершины должны находиться на одинаковом расстоянии от оси вращения [2].

Представленные схемы точения двумя резцами имеют один общий недостаток, который связан с возникновением вибраций вследствие взаимного влияния реализуемых процессов резания друг на друга, – при совпадении частот вынужденных колебаний одного и другого процессов резания появляются резонансные явления. Для исключения этого недостатка целесообразно для одного из процессов резания обеспечить управляемое закономерное изменение уровня вибраций. Данная задача может быть решена включением в один из процессов резания управляемой кинематической неустойчивости, например, путем модулированного изменения подачи в функции пути. С целью его осуществления был разработан и включен в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ КМ85 модуль, позволяющий периодически увеличивать подачу от  $S_{\min}$  до  $S_{\max}$ , а затем снижать ее до первоначального значения [3]. Изменение подачи между ее пиковыми значениями при этом производится приращениями величиной  $\Delta S$  по мере обработки участков  $\Delta l$  между приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимость  $S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S$  и зависимость  $S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S$ , где  $n_s$  – число приращений скорости подачи при ее изменении от  $S_{\min}$  до  $S_{\max}$ . Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения  $l_1 = n_s \Delta l$ ; значение  $\Delta S$  выбирается кратным 0,1 мм/мин;  $\Delta l$  принимается кратной единице дискретности.

Поверхность детали, образованная в процессе ее изготовления, всегда имеет неровности в виде выступов и впадин различных величин с небольшими расстояниями между ними. Совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины, представляет собой шероховатость поверхности. Волнистостью поверхности называют совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными выступами или впадинами превышают базовую длину. Обе геометрические характеристики поверхности являются важными показателями технического уровня продукции машиностроения.

На качество поверхности, обработанной резанием, оказывает влияние множество причин, которые объединяют в три основные группы [4]. К первой группе относятся причины, связанные с геометрией процесса резания, – это форма и состояние режущих кромок, а также элементы режимов резания, которые оказывают влияние на траекторию режущих кромок относительно обрабатываемой поверхности. Ко второй группе относятся причины, связанные с упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала. Наконец, третью группу составляют причины, связанные с возникновением вибраций в процессе резания, которые приводят к отклонению действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от траектории заданной. Вибрации, упругие и пластические деформации обрабатываемого материала нарушают закономерное распределение неровностей на поверхности, искажают их форму, существенно увеличивают их высоту.

При совместном точении двумя резцами, установленными на разных суппортах, происходит взаимовлияние реализуемых процессов резания друг на друга, что, естественно, ведет к изменению механизма действия практически всех причин, оказывающих влияние на качество поверхности. Поэтому задача оценки таких показателей качества поверхности, как шероховатость и волнистость, при обработке заготовок на двухсуппортных станках, оснащенных устройством с ЧПУ с функцией независимого управления, является актуальной.

Форму и размеры неровностей, как правило, измеряют в направлении движения резания и в направлении, перпендикулярном этому движению. Высота неровностей поверхности, измеренная в направлении движения резания, характеризует продольную шероховатость поверхности. Поперечная шероховатость измеряется перпендикулярно движению резания (в направлении подачи). Размеры поперечной шероховатости при токарной обработке обычно в два-три раза превышают продольную шероховатость. Вследствие этого оценку шероховатости поверхности при точении обычно производят на основании измерения поперечной шероховатости, которая зависит главным образом от геометрии режущей части инструмента и величины подачи [2].

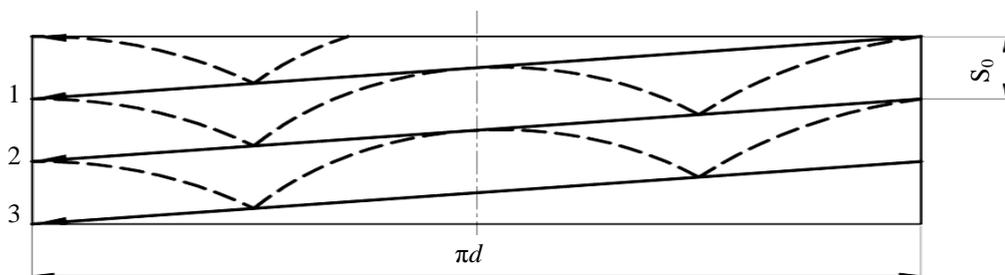
Основная причина образования волнистости – отклонение действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от заданной. Из всего многообразия физических процессов, происходящих в работающей технологической системе, наибольшее влияние на рассогласование траектории движения оказывают вибрации. Колебательные движения режущего инструмента в радиальном направлении, накладываясь на вращательное движение заготовки, приводят к образованию продольной волнистости, измеряемой в направлении движения резания. На характер колебаний, а следовательно,

на волнистость существенное влияние оказывает жесткость технологической системы. Наибольшая волнистость, как правило, образуется при обработке заготовок малой жесткости [2].

При точении с модулированной подачей в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи одного из режущих инструментов, на систему, находящуюся в колебательном движении, колебания гасятся, что должно привести к значительному уменьшению продольной волнистости.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием станка мод. 1А734ФЗ, оснащенного устройством ЧПУ с функцией независимого управления суппортами и функцией модулированной подачи. Обработывалась наружная поверхность втулок из стали 40ХН (длина втулки 145 мм, наружный диаметр 150 мм, внутренний 135 мм) при консольном креплении в патроне и частоте вращения шпинделя  $n_{ш} = 255$  об/мин. Обработка велась резцами с механическим креплением пластины твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части:  $\gamma = 8^\circ$ ;  $\alpha = 12^\circ$ ;  $\varphi = 95^\circ$ ;  $\varphi_1 = 5^\circ$ ;  $r_6 = 0,8$  мм. В качестве смазывающей охлаждающей жидкости применялась эмульсия НГЛ-205. Обработывались две партии заготовок. Наружная поверхность заготовок первой партии обрабатывалась точением с делением глубины резания. Черновой рабочий ход с глубиной резания  $t = 2,5$  мм и скоростью резания  $v = 120,9$  м/мин выполнялся резцом, установленным в револьверной головке правого суппорта. Резец, установленный в револьверной головке левого суппорта, выполнял чистовой рабочий ход с глубиной резания  $t = 0,5$  мм. Скорость резания при этом составляла 120,1 м/мин. Заготовки первой партии были разбиты на три группы. Точение наружной поверхности заготовок первой группы осуществлялось последовательно (после черновой обработки наружной поверхности втулки резцом, установленным на правом суппорте, включался в работу чистовой резец, установленный на левом суппорте). Наружная поверхность заготовок второй группы обрабатывалась совместно двумя резцами (начало и конец рабочего хода для обоих суппортов синхронизированы). При обработке заготовок третьей группы черновой рабочий ход выполнялся с модулированной подачей, среднее ее значение равнялось подаче, с которой перемещался чистовой резец.

При обработке заготовок второй партии была реализована схема точения с делением подачи (оба рабочих хода выполнялись с глубиной резания  $t = 3$  мм и скоростью резания  $v = 120,1$  м/мин). Заготовки этой партии были разбиты на две группы. Наружные поверхности втулок первой партии обрабатывались двумя резцами совместно с подачей, которая назначалась из условия обеспечения технологических требований к процессу резания. При обработке наружных поверхностей втулок второй группы резец, установленный в револьверной головке правого суппорта, перемещался с модулированной подачей, среднее значение которой было равно подаче резца, установленного на левом суппорте (рис. 3).



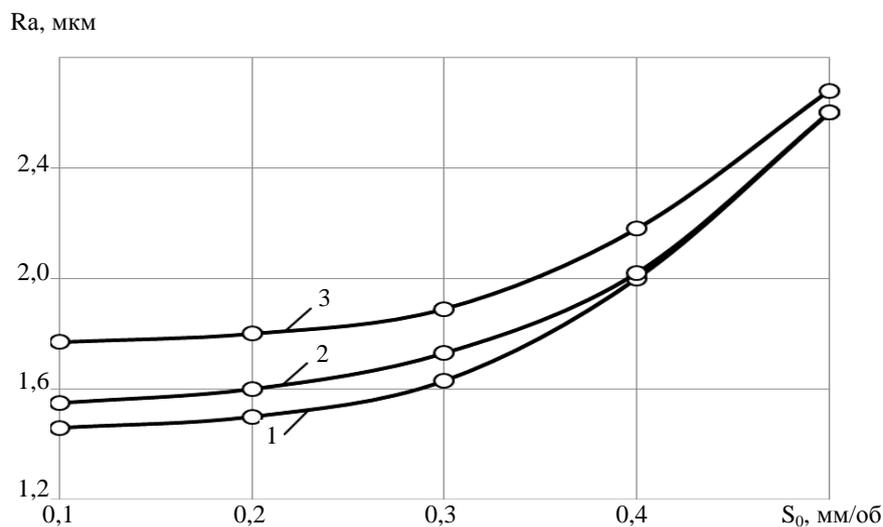
сплошная линия – след вершины резца, работающего с постоянной подачей;  
пунктирная линия – с модулированной подачей

**Рисунок 3. – Схема следов вершин резцов на развертке наружной поверхности втулки при совместном точении двумя резцами с делением подачи**

Запись микронеровностей обработанной поверхности проводилась на профилометре-профилографе мод. 253. Шероховатость поверхности оценивалась по значениям  $R_z$  и  $R_a$ . Продольная волнистость записывалась на кругломере Tolugond (Англия). Графики строились по средним значениям, полученным в результате обработки тридцати измерений. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних значений измерений производились согласно [5].

Установлено, что при точении двумя резцами совместно с делением глубины резания значения  $R_a$  меньше для варианта выполнения чернового рабочего хода с модулированной подачей. Причем эффект уменьшения шероховатости наиболее ярко проявляется при меньших значениях подачи (рис. 4). Данное явление можно объяснить тем, что при обработке двумя резцами одновременно взаимодействуют два нестационарных по своей природе процесса резания, определяемых рядом систематических и случайных факторов. При этом наблюдаются резонансные явления, что приводит к возникновению вибраций и, как следствие, к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Это подтверждается результатами

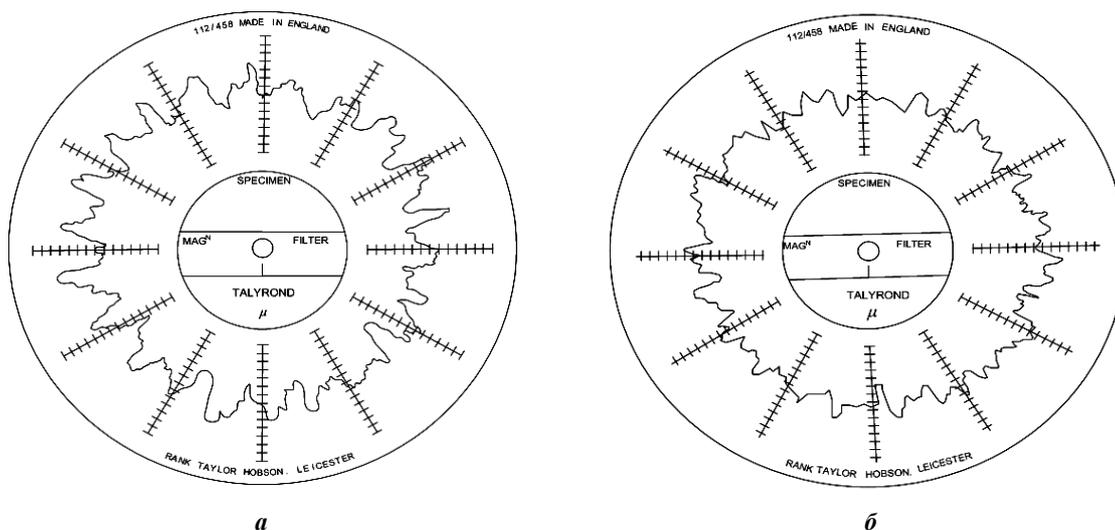
выполненных исследований (шероховатость поверхности, обработанной двумя резцами последовательно, значительно ниже шероховатости поверхности, обработанной двумя резцами совместно). При выполнении чернового рабочего хода с включением в процесс резания кинематической неустойчивости в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи, на систему, находящуюся в колебательном движении, колебания гасятся, шероховатость обработанной поверхности при этом уменьшается.



- 1 – оба, черновой и чистовой, рабочие хода выполнены последовательно;  
 2 – черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом;  
 3 – оба рабочие хода выполнены совместно с постоянной подачей

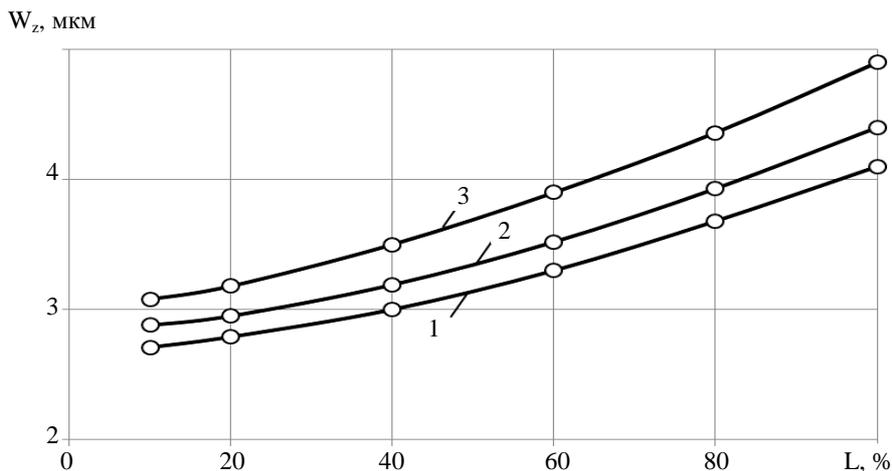
**Рисунок 4.** – Зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от подачи при точении двумя резцами с делением глубины резания

Анализ ряда волнограмм (рис. 5) показал, что при обработке с модулированной подачей высота продольной волнистости значительно меньше, чем при обработке с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной. Причем эффект уменьшения высоты волнистости изменяется по мере перемещения резца по длине заготовки (по мере изменения жесткости технологической системы). С уменьшением расстояния от точки приложения силы резания до установочной базы заготовки (рис. 6) эффект уменьшения высоты продольной волнистости проявляется в меньшей степени. График построен по средним значениям тридцати замеров.



- а** – черновой рабочий ход выполнен с постоянной подачей; **б** – с модулированной

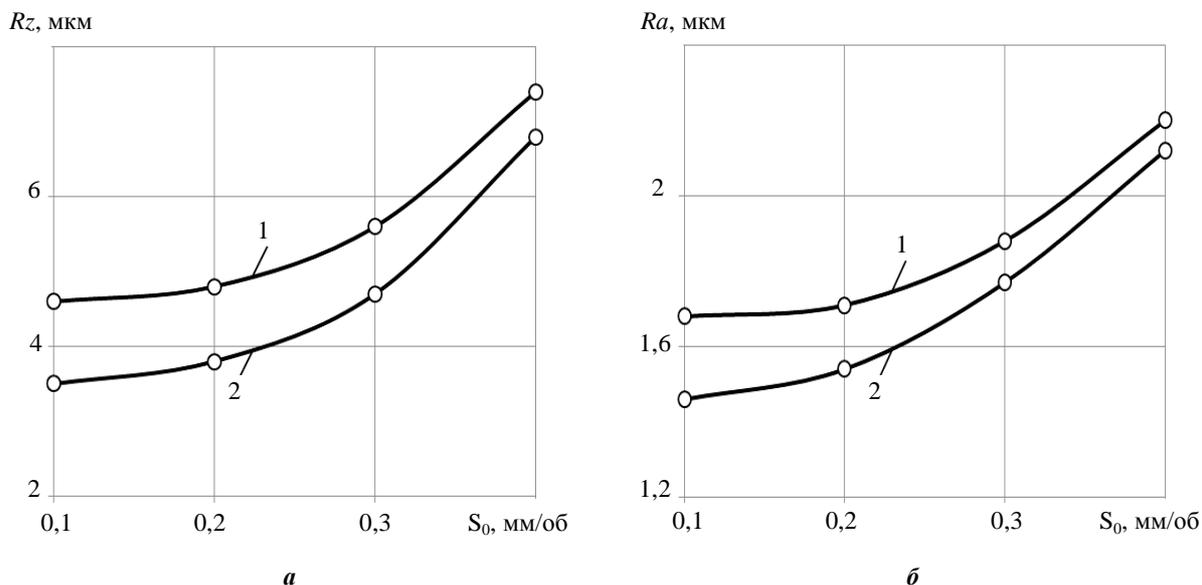
**Рисунок 5.** – Волнограммы при точении наружных поверхностей втулок двумя резцами с делением глубины резания



- 1 – черновой и чистовой рабочие ходы выполнены последовательно;
- 2 – черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом;
- 3 – оба рабочие хода выполнены с постоянной подачей совместно

**Рисунок 6. – Влияние длины консоли на высоту продольной волнистости при точении с делением глубины резания**

Экспериментальные исследования процесса точения двумя резцами с делением подачи выполнены при обработке втулок из стали 40ХН (размеры втулок и режимы резания указаны выше). Некоторые частные зависимости параметров шероховатости при точении двумя резцами совместно с делением подачи, полученные классическим методом (методом Гаусса – Зойделя), представлены на рисунке 7.



- 1 – черновой рабочий ход выполнен с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей

**Рисунок 7. – Зависимость высоты микронеровностей Rz (а) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (б) от подачи при точении двумя резцами совместно с делением подачи**

В результате выполненных экспериментов установлено, что включение в процесс резания одним из резцов модулированной подачи обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности и надежное дробление стружки. Уменьшение шероховатости, как и при точении двумя резцами с делением глубины резания, обусловлено снижением уровня вибраций технологической системы за счет уменьшения вероятности возникновения резонансных явлений при наложении друг на друга однородных процессов резания. Надежное дробление стружки обеспечивается за счет периодического совпадения поверхностей резания обоих резцов.

Влияние параметров подачи на величину среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  при включении в процесс резания одним из резцов кинематической нестабильности исследовали по методу полного факторного эксперимента  $2^3$ . Переменными факторами являлись: подача резца, установленного на левом суппорте  $S_o$ , мм/об; коэффициент модулированного изменения подачи резца, установленного на правом суппорте  $K_m$ ; длина обработки, соответствующая изменению подачи между ее пиковыми значениями  $l_1$ , мм. Основные характеристики плана экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Факторы, уровни и интервалы варьирования

Уровень	Кодированное значение	Фактор		
		$x_1(S_o, \text{мм/об})$	$x_2(K_m)$	$x_3(l_1, \text{мм})$
Интервалы варьирования:		0,15	0,2	0,4
- основной	0	0,25	0,6	0,8
- верхний	+1	0,4	0,8	1,2
- нижний	-1	0,1	0,4	0,4

Подача левого суппорта  $S_o$  определяет производительность обработки при совместной работе двумя суппортами и принимается не менее половины расчетной подачи, которая назначается из условия обеспечения технологических требований к процессу резания.

Коэффициент  $K_m$  равен отношению нижнего пикового значения подачи к ее верхнему пиковому значению. Фактически нижний и верхний уровни  $K_m$  определяют пиковые значения модулированной подачи на обороты  $S_{o_{min}}$  и  $S_{o_{max}}$ , которые назначаются из условия, что их средняя сумма должна быть равна подаче на оборот  $S_o$  резца, работающего с постоянной подачей.

Длина обработки  $l_1$ , на которой происходит изменение подачи между ее пиковыми значениями (длина пути разгона – замедления), определяет частоту модуляции подачи. По данным [6], эффект от метода обработки с модулированной подачей может быть получен при частоте модуляции около 2,75 Гц. Величина  $l_1$  для указанной частоты модуляции может изменяться в пределах от 0,4 до 1,2 мм.

Матрица планирования и результаты полного факторного эксперимента приведены в таблице 2. Эксперимент проведен с учетом рандомизации опытов. Все расчеты, необходимые для определения величины среднеквадратической ошибки опыта и значимости коэффициентов, выполнены согласно [5].

Коэффициенты регрессии равны:  $b_0 = 1,712$ ;  $b_1 = 0,337$ ;  $b_2 = -0,050$ ;  $b_3 = 0,012$ ;  $b_{1,2} = 0,000125$ ;  $b_{1,3} = -0,0125$ ;  $b_{2,3} = -0,015$ ;  $b_{1,2,3} = -0,015$ .

С учетом значимости коэффициентов регрессии математическая модель имеет вид

$$y = 1,71 + 0,34x_1 - 0,05x_2 + 0,012x_3. \quad (1)$$

Таблица 2. – Матрица планирования и результаты опыта

$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_i$
				мкм		
+1	-1	-1	+1	1,49	1,43	1,55
+1	+1	-1	+1	2,14	2,10	2,12
+1	-1	+1	+1	1,31	1,37	1,34
+1	+1	+1	+1	2,02	1,94	1,98
+1	-1	-1	-1	1,39	1,43	1,41
+1	+1	-1	-1	2,03	2,09	2,06
+1	-1	+1	-1	1,32	1,26	1,29
+1	+1	+1	-1	2,01	2,07	2,04

Адекватность уравнения проверена и подтверждена по критерию Фишера. В уравнении (1) факторы представлены в кодовых значениях.

Пользуясь зависимостями:

$$x_1 = \frac{S_o - 0,15}{0,15}, \quad x_2 = \frac{K_m - 0,6}{0,2}, \quad x_3 = \frac{l_1 - 0,8}{0,4},$$

получим уравнение (1) в натуральных величинах:

$$Ra = 1,27 + 2,26S_o - 0,25K_m + 0,03l_1. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для значений  $S_o$ ,  $K_m$ ,  $l_1$  в выбранных пределах варьирования.

Анализ полученной математической модели (2) показывает, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает значение подачи  $S_o$ , с которой перемещается левый суппорт (с ее увеличением шероховатость возрастает). Меньше влияет на величину микронеровностей коэффициент  $K_m$  модулированного изменения подачи резца, установленного на правом суппорте. При его уменьшении шероховатость обработанной поверхности увеличивается.

**Заключение.** Включение в состав технологического программного обеспечения микропроцессорных устройств ЧПУ программного модуля, реализующего алгоритм модулированного изменения подачи, расширяет функциональные возможности технологического оборудования. Для токарных станков с независимым управлением суппортами это выражается в возможности создания схем совмещения, обеспечивающих повышение производительности обработки при изготовлении нежестких деталей.

Вследствие повышения устойчивости технологической системы к автоколебаниям в процессе точения двумя резцами (совместно) с делением глубины резания и сообщением черновому резцу модулированной подачи уменьшается шероховатость и продольная волнистость обработанной поверхности. Наибольшее влияние на шероховатость поверхности, обработанной двумя резцами с делением подачи, оказывает подача  $S_o$  резца, совершающего равномерное движение (с увеличением  $S_o$  наблюдается рост значений  $Ra$ ). Длина пути разгона (замедления)  $l_1$  в интервале от 0,4 до 1,2 мм на шероховатость обработанной поверхности влияет незначительно и может назначаться только из условия повышения уровня виброустойчивости технологической системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каштальян, И.А. Программная реализация функции независимого управления координатными перемещениями / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Автоматизация и роботизация процессов и производств : материалы науч.-практ. семинара, Минск, 13 февр. 2014 г. ; редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 33–35.
2. Махаринский, Е.И. Основы технологии машиностроения : учебник / Е.И. Махаринский, В.А. Горохов. – Минск : Выш. школа, 1997. – 423 с.
3. Каштальян, И.А. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 115–126.
4. Маталин, А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – Киев : Техника, 1971. – 144 с.
5. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М.Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
6. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1978. – 304 с.

Поступила 22.12.2016

#### ROUGHNESS AND WAVINESS OF SURFACE SURFACES PROCESSED ON TWO SUPPORT LATHES WITH NUMERICAL SOFTWARE CONTROL

*I. KASYTALYAN, B. ORUKARI*

*The problem of increasing the productivity of two support lathes with numerical program control by optimal combination of various technological transitions is considered. The results of experimental studies of the roughness and undulation of the surfaces of machine parts treated with two incisors together with the inclusion of kinematic instability in the cutting process are presented.*

**Keywords:** *surfaces of parts, roughness, waviness, two support lathes with numerical program software control.*

УДК 621.891

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОСИСТЕМ С УЧЕТОМ ГРАДИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ***канд. техн. наук, доц. О.А. МИКОСЯНЧИК**(Национальный авиационный университет, Киев, Украина);**д-р техн. наук, проф. Б.А. ЛЯШЕНКО**(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, Киев, Украина);**д-р техн. наук, доц. Н.О. КУЗИН**(Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, Украина);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается практическое применение методики прогнозирования оптимальной структуры поверхностных слоев, образующейся в процессе эксплуатации элементов трибосопряжения. Методика основана на определении усредненного значения микротвердости приповерхностных слоев материала в некоторой рассматриваемой локальной области деформируемого при трении объема контактных поверхностей глубиной до 80 мкм. Показана возможность прогнозирования износа контактных поверхностей в условиях качения с различной степенью проскальзывания, зависящей от величины эффективной («интегральной») микротвердости, учитывающей микротвердость поверхностных слоев металла в процессе структурной приспособляемости при трении и градиентность распределения микротвердости по глубине деформируемого слоя. Установлена корреляционная взаимосвязь между износом элементов трибосопряжения и значениями микротвердости поверхностных слоев трибосистем и градиентным ее распределением, позволяющая разрабатывать практические рекомендации по режимам технологической и эксплуатационной модификации элементов узлов трения.*

**Ключевые слова:** *трибосистема, трибосопряжение, контактная поверхность, корреляционная связь, эвольвентный профиль, трибоконтакт, износ, питтинг, микротвердость.*

Установление оптимальных параметров структуры поверхностных слоев контактирующих пар и прогнозирование их эксплуатационных характеристик на основе распределения механических свойств в элементах конструкций – важнейшие проблемы современной трибологии. При этом ограниченное количество экспериментальных данных, которые позволяют устанавливать связь между структурой поверхностных слоев и поведением трибосистем, сложность физико-химических процессов, сопровождающих явление фрикционного взаимодействия, существенно затрудняют выделение основных факторов, имеющих определяющее значение для работы контактных пар [1]. Данное обстоятельство существенно ограничивает управление технологическими режимами модификации поверхностей, особенно в случае использования аддитивных технологий, и как результат, приводит к ограничению информации, необходимой для разработки рекомендаций по поверхностному упрочнению деталей узлов трения, которая восполняется принятием решений на основе инженерной интуиции или практического опыта.

**Анализ публикаций и постановка проблемы.** Причиной неравномерного износа эвольвентных зубчатых передач является непостоянство условий трения для всех точек контактирующих поверхностей вдоль эвольвентного профиля. Поверхностные слои в процессе эксплуатации зубчатых колес разрушаются в результате циклического действия изгибающих напряжений и изнашивания от проскальзывания контактирующих поверхностей по линии зацепления к вершине (корню) зуба. Износ полюсной и околополюсной зоны в зависимости от твердости материала, контактных нагрузок и скорости рассмотрен в работе [2], о наличии пластических деформаций в указанных зонах вследствие искажения эвольвентного профиля при износе можно судить по высокой степени наклепа материала [3].

При использовании в качестве смазочного материала для средне- и высоконагруженных зубчатых передач трансмиссионных масел с активными компонентами противоизносных и противозадирных присадок существенно изменяются механохимические свойства трибоконтакта. Первичный процесс пластифицирования материала при адсорбции поверхностно-активных веществ заканчивается стадией значительного упрочнения поверхностного слоя металла [4]. Упрочнение поверхностного слоя в активной смазочной среде оказывает экранирующее действие для распространения вглубь металла пластической деформации [5]. В работе [6] установлена взаимосвязь между переходом пластической деформации, обуславливающей интенсификацию износа, и упругой, характеризующейся минимальным износом и этапами формирования защитных прочных граничных смазочных слоев. Опыт эксплуатации зубчатых передач

показывает, что контактная выносливость поверхностей зубьев зависит от толщины смазочных слоев, которые, в свою очередь, влияют на силы трения и напряженное состояние в контакте [7]. В работе [8] установлена прямая корреляция развития усталостных повреждений (питтинга и растрескивания) поверхностных слоев металла зубчатых передач с параметрами смазочного действия и шероховатостью контактных поверхностей.

Контактные условия предопределяют зарождение трещин на поверхности или в подповерхностных слоях боковых поверхностей зубьев. Распространение трещин может привести к отказу вследствие проявления питтинга, отслаивания либо излома кромки зуба [9].

Согласно [10], для условий качения и качения со скольжением сопротивление усталости зависит от различных факторов, таких как упругопластическая деформация, свойства материала контактных поверхностей, физико-химические свойства смазочного материала, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, нагрузочно-скоростные параметры контакта. При этом зарождение трещин может проявляться вблизи поверхности деформированной зоны либо в области максимального циклического напряжения сдвига. В работе [11] представлена математическая модель определения максимальных касательных напряжений в эластогидродинамическом контакте. Зависимость градиента распространения касательных напряжений по глубине от геометрических параметров зубчатых передач и нагрузки рассмотрена в работе [12].

Таким образом, проведенный краткий анализ научных исследований, связанных с установлением закономерностей между смазочным действием, локализацией максимальных касательных напряжений и износостойкостью пар трения, показал, что не существует единого мнения о влиянии указанных параметров на износ неконформных узлов трения. В связи с этим необходима разработка единых научно обоснованных и совершенных с технической точки зрения комплексных методик триботехнических испытаний, которые бы охватывали многообразие эффектов взаимодействия компонентов смазочных материалов с активированной поверхностью металла. Исследования пар трения качения, особенно пар качения с переменным проскальзыванием, составляющих значительную долю узлов трения машин и механизмов (подшипники качения, зубчатые передачи), немногочисленны, недостаточно изучены и нуждаются в дальнейшем углубленном анализе.

В этой связи актуальной является разработка математических подходов по установлению оптимальных параметров поверхностных слоев контактных пар, опираясь на ограниченную информацию результатов натурных испытаний. Разработка методики прогнозирования износа элементов трибосопряжения на основе оценки изменения микротвердости приповерхностных слоев металла в локальной деформируемой области при структурной приспособляемости контактных поверхностей в нестационарных условиях трения качения с переменным скольжением и явилась целью представляемой работы.

**Материалы и методика исследования триботехнических характеристик контакта.** Исследования проводились на автоматизированном комплексе для оценки триботехнических характеристик трибозвеньев [13].

Методика оценки распространения упругопластической деформации в приповерхностных слоях металла заключается в следующем:

- провести приработку контактных поверхностей в нестационарных условиях трения (режим пуск – остановка);
- провести наработку до стабилизации основных триботехнических показателей контакта (толщины смазочного слоя при остановке, в пусковой период и в период, соответствующий выбранным максимальным скоростям качения опережающей и отстающей поверхностей; коэффициента трения; удельной работы трения), которые характеризуют формирование стабильного граничного слоя компонентами смазочного материала;
- прекратить подачу смазочного материала в зону трения, при этом ветошью удалить остатки смазочного материала с контактных поверхностей;
- фиксировать изменение основных триботехнических показателей контакта до проявления первых признаков схватывания контактных поверхностей;
- на приборе ПМТ-3 провести измерения микротвердости приповерхностных слоев металла на глубину до 300 мкм по всей длине контакта элементов трибосопряжения для определения ее 3D-функционального распределения (градиентности).

Момент трения, частота оборотов роликов, температура смазочного материала, падение напряжения в смазочном слое в контакте записываются и обрабатываются на персональном компьютере (программное обеспечение ProfiLab) в реальном масштабе времени с графическим изображением их изменений.

Исследуемые нестационарные условия трения подразумевают цикличность проведения экспериментов в режиме «запуск – стационарная работа – торможение – остановка».

Максимальная частота оборотов для опережающей поверхности составила 1000 об/мин. В работе имитировалось проскальзывание 3, 10, 20, 30 и 40%. Максимальное контактное напряжение по Герцу

составило 250 МПа. В качестве образцов использовались ролики из стали 45 (HRC 38, Ra 0,57 мкм). Смазывание контактных поверхностей осуществлялось путем окунания нижнего ролика в ванночку с маслом. В качестве смазочного материала использовалось минеральное трансмиссионное масло для механических коробок передач и главных передач легковых и грузовых автомобилей Okko GL-4 80w/90. Объемная температура масла составляла 20 °С.

#### Результаты и их обсуждение

**Набор эмпирической информации.** В качестве исходной информации для прогнозирования оптимальной структуры поверхностных слоев использовали распределение измерения микротвердости, полученное на образцах, работавших в нестационарных условиях трения при качении с разной степенью проскальзывания, а также величину суммарного износа этих образцов (табл. 1).

Таблица 1. – Результаты измерения микротвердости по образцам и их эксплуатационные характеристики

Образец	Величина микротвердости HV, МПа								Суммарный износ опережающей и отстающей поверхностей, мкм
	Расстояние от поверхности, мкм								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
Образец 1 (проскальзывание 3%)	3451	3451	3451	3708	3708	3853	4010	4179	5,96
Образец 2 (проскальзывание 10%)	3575	4564	5570	5570	5287	5023	5023	4783	3,83
Образец 3 (проскальзывание 20%)	3336	3451	3575	3853	5899	5570	5570	5570	4,27
Образец 4 (проскальзывание 30%)	4023	5023	5287	5287	5570	6255	6255	7095	5,08
Образец 5 (проскальзывание 40%)	4023	5287	5287	5287	5570	5570	6255	6255	6,11

**Подход к прогнозированию.** Для установления оптимальных параметров структуры поверхностных слоев, согласно работе [14], априори приняли, что эксплуатационные свойства материала (износ) зависят как от характеристик микротвердости поверхностных слоев, так и от распределения их вглубь материала:

$$I = F(HV(x)), \quad (1)$$

где  $HV$  – микротвердость;  $x$  – переменная, описывающая расстояние вглубь от поверхности детали.

Поэтому в качестве меры функции  $F(HV(x))$  приняли интегральное осреднение распределения микротвердости [14]:

$$F(HV(x)) = HV_{эф} = \frac{1}{L} \int_L HV(x) dx, \quad (2)$$

где  $L$  – величина рассматриваемой характерной глубины (примем  $L \approx 80$  мкм).

В линейном приближении функция  $HV(x)$  имеет вид:

$$HV(x) = HV_0 + k \cdot x, \quad (3)$$

где  $HV_0$  – микротвердость на поверхности, МПа;  $k$  – величина градиента микротвердости, МПа/мкм.

Степень упрочнения приповерхностных слоев металла на некоторую глубину зависит от скорости скольжения контактных поверхностей. С повышением скорости скольжения от 0,062 до 1,15 м/с, что соответствует увеличению степени проскальзывания с 3 до 40% соответственно, интенсифицируются процессы тепловыделения во фрикционном контакте, возрастает градиент скорости сдвига смазочных слоев, в результате чего создаются предпосылки для деструкции сформированных граничных пленок смазочного материала. Вследствие этого увеличивается область распространения касательных напряжений сдвига вглубь металла и возникают локальные участки напряженно-деформированного состояния приповерхностных слоев, в которых независимо от скорости скольжения опережающей и отстающей поверхностей реализуется правило положительного градиента механических свойств по глубине, повышая тем самым износостойкость пар трения.

С учетом (3) соотношение (2) имеет вид:

$$HV_{эф} = F(HV(x)) = \frac{1}{L} \left( HV_0 \cdot L + k \cdot \frac{L^2}{2} \right) = HV_0 + k \cdot \frac{L}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, рассматриваемый параметр эффективной микротвердости представляет собой осредненный показатель распределения микротвердости в некоторой локальной области, охватывающей

глубину распространения упругопластических деформаций при трении. Данный параметр является прочностным критерием, характеризующим пространственную неоднородность распределения микротвердости в результате эксплуатационной модификации контактных поверхностей при трении.

В качестве величины микротвердости на поверхности примем значение микротвердости на глубине 10 мкм (см. таблицу 1), а градиент определим как отношение разницы значений микротвердости на глубине 80 и 10 мкм к значению разницы глубин (80...10) мкм. В результате получим зависимость износа от эффективной микротвердости, поверхностной микротвердости и градиента. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Зависимость эксплуатационных характеристик материала от обобщенных параметров распределения микротвердости

Образец	Поверхностная микротвердость, МПа	Градиент, МПа/мкм	Эффективная микротвердость, МПа	Суммарный износ опережающей и отстающей поверхностей, мкм
Образец 1 (проскальзывание 3%)	3451	10,4	3857	5,96
Образец 2 (проскальзывание 10%)	3575	17,2	4263	3,83
Образец 3 (проскальзывание 20%)	3336	31,9	4612	4,27
Образец 4 (проскальзывание 30%)	4023	43,8	5775	5,08
Образец 5 (проскальзывание 40%)	4023	31,8	5295	6,11

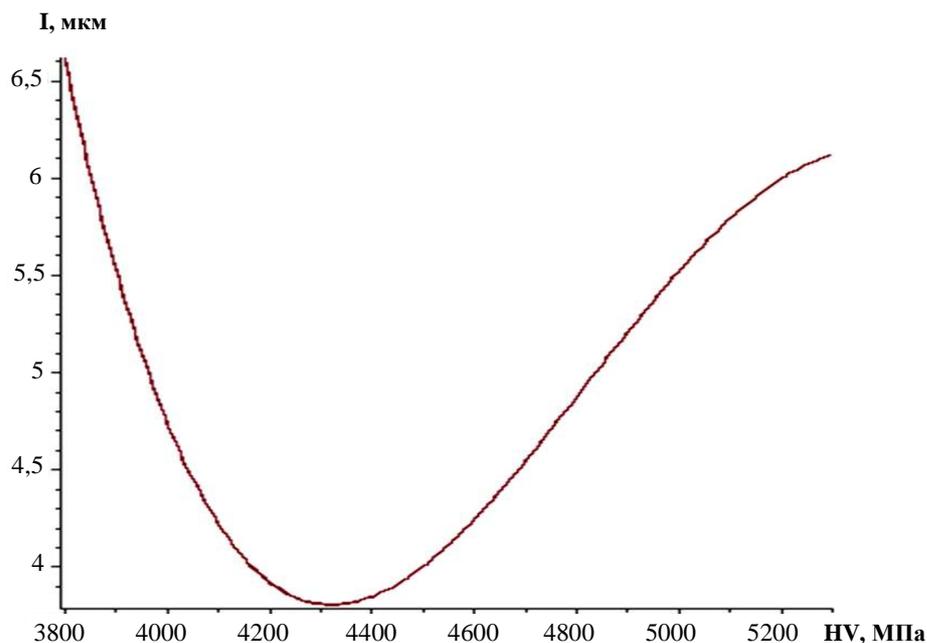
#### Результаты прогнозирования

Найдем аналитическую зависимость величины износа  $I$  от  $HV_{эф}$ :

$$I = 7,074211011 \cdot 10^{(-13)} \cdot h^4 - 1,778035727 \cdot 10^{(-8)} \cdot h^3 + 0,1584466714 \cdot 10^{(-3)} \cdot h^2 - 0,6016932517 \cdot h + 833,2181630, \quad (5)$$

где  $h$  – эффективная («интегральная») микротвердость.

Зависимость величины  $I(h)$  представим графически на рисунке.



Зависимость износа  $I$  от параметра  $HV_{эф}$

Как видно из представленного выше рисунка, зависимость имеет минимум величины износа при значении микротвердости в интервале от 4200 до 4400 МПа.

Решим задачу по нахождению величины  $HV_{эф}^*$ , обеспечивающей минимальную величину износа:

$$HV_{эф}^* : I \rightarrow \min. \quad (6)$$

Задача вида (6) эквивалентна следующей системе уравнений:

$$HV_{эф}^* : \begin{cases} \frac{\partial I}{\partial HV} = 0, \\ \frac{\partial^2 I}{\partial HV^2} > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Из данной системы найдем  $HV_{эф}^* = 4323$  МПа. При этом прогнозируемое значение износа будет на уровне 3,80 мкм.

Отметим, что получить заданное значение эффективной микротвердости, при которой максимально уменьшается износ пары трения, можно как при помощи изменения величины поверхностной микротвердости, так и при помощи регулирования значения ее градиента.

Например, при заданном значении микротвердости 3575 МПа значение градиента микротвердости должно быть равным

$$k = \frac{2 \cdot (4323 - 3575)}{80} = 18,7 \text{ МПа / мкм.}$$

При значении градиента 17,2 МПа / мкм значение поверхностной микротвердости составит

$$HV_0 = \left( 4323 - \frac{1}{2} \cdot 17,2 \cdot 80 \right) = 3635 \text{ МПа.}$$

**Заключение.** В результате проведенного исследования рассмотрена проблема установления оптимальных структурных параметров трибосистем на основе ограниченной информации натуральных испытаний и сделаны следующие *выводы*:

- в качестве меры функционального распределения свойств поверхностных слоев принято интегральное осреднение значения микротвердости, которое сопоставляется с износом узла трения;
- предложенная методика позволяет определить оптимальные значения микротвердости как поверхностных слоев трибосистем, так и значение их градиента и дать практические рекомендации по режимам технологической и эксплуатационной модификации элементов узлов трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Б.А. Ляшенко [и др.] ; под ред. В.В. Харченко. – К. : Ин-т проблем прочности, 2010. – 193 с.
2. Ognjanovic M. Progressive Gear Teeth Wear and Failure Probability Modeling / M. Ognjanovic // Tribology in industry. – 2004. – Vol. 26, № 3&4. – P. 44–49.
3. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования / А.П. Бурдуков [и др.] // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 99–105.
4. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C60 к моторному маслу / Н.Ф. Дмитриченко [и др.] // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550–555.
5. Surfactant effects on the residual internal stresses in hydrated mineral binders / E.D. Shchukin [et al.] // Abstracts of the 13-th International Symposium on Surfactants in Solution, Gainesville, Florida, June 11–16, 2000. – P. 163.
6. Механизм формирования защитного граничного смазочного слоя / Б.И. Ковальский [и др.] // Изв. ТулГУ : Технические науки. – 2014. – Вып. 3. – С. 26–32.
7. Hutchings, I.M. Tribology: friction and wear of engineering materials / I.M. Hutchings ; ed. Butterworth. – Heinemann, Oxford, 1992. – P. 58–76.

8. Magalhães, L. Austempered ductile iron (ADI) gears : Power loss, pitting and micropitting / L. Magalhães, J. Seabra and R. Martins // *Wear*. – 2007. – Vol. 264. – P. 839–849.
9. Cheng, H.S. Elastohydrodynamic Lubrication, in *Handbook of lubrication* / H.S. Cheng, E.R. Booser ; Ed. CRC Pres : Boca Raton, 1983. – P. 155–160.
10. A fracture mechanics model for the analysis of micro-pitting in regard to lubricated rolling – sliding contact problems / B. Zafosnik [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29, Iss. 9–11. – P. 1950–1958.
11. Sadeghi, F. Subsurface Stresses in Rolling / Sliding Machine Components / F. Sadeghi, C. Ping Sui // *International Compressor Engineering Conference*, 1988. – P. 680.
12. Tobie, T. Case Depth and Load Capacity of Case-Carburized Gears / T. Tobie, P. Oster, B. Höhn // *Gear Technology*. – 2002. – March/April. – P. 31–38.
13. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів : корисна модель UA 88748 / О.О. Мікосянчик. – Опубл. 25.03.14.
14. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций / Н.О. Кузин [и др.] // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – № 6/1(26). – С. 4–8.

Поступила 11.01.2017

**SELECTION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE SURFACE LAYERS  
OF THE STRUCTURE TRIBOSYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT  
THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE GRADIENT**

**O. MIKOSYANCHIK, B. LYASHENKO, N. KUZIN, A. DUDAN**

*The practical application of methodology to predict the optimal structure of the surface layers, formed during the operations of tribological conjunction elements, is addressed. The technique is based on the determination of the mean value of surface layers micro-hardness of the material at some local area of deformed by friction contact surfaces up to 80 mkm depth. The possibility of predicting the wear of contact surfaces, under rolling with varying degrees of slipping, from the value of the effective (“Integral”) micro-hardness, taking into account the micro-hardness of the surface of the metal layers in the process of structural adaptability at friction and gradient distribution of micro-hardness depth of the deformable layer is presented. The correlation is established between the wear of tribological conjunction elements and micro-hardness values of both tribosystems surface layers and its gradient distribution and allows to develop practical recommendations for modification of technological modes of elements of friction units.*

**Keywords:** tribosystem, tribocorrosion, surface, correlation, involute profile, tribocontact, wear, pitting corrosion, microhardness.

УДК 621.91.04

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК; С.А. ПОРТЯНКО; А.С. МАКСИМЧУК  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается проблема совершенствования конструкций блочно-модульных торцовых фрез на основе исследования характеристик процесса резания. Представлены результаты экспериментальных исследований температуры в зоне резания, шумов и вибраций технологической системы, шероховатости обработанной поверхности в зависимости от режимов резания. На основе полученных данных изготовлен экспериментальный образец (макет) фрезы с использованием современной технологии 3D-печати для высокоточной обработки плоских поверхностей.*

**Ключевые слова:** режимы резания, металлорежущий инструмент, механическая обработка, 3D-моделирование, быстрое прототипирование.

**Введение.** Применение сборных режущих инструментов в промышленности достигает 70% от общего количества инструмента, причем одну треть этих инструментов составляют сборные торцовые фрезы. Все большее распространение получают сборные торцовые фрезы, состоящие из взаимозаменяемых модулей, применение которых значительно сокращает затраты на производство. В основном используются модульные конструкции сборных фрез зарубежных фирм, которые обладают высокой надежностью и обеспечивают точную обработку поверхностей деталей [1]. Производство модульных торцовых фрез на отечественных предприятиях ограничивается высокими технологическими требованиями к их изготовлению. Поэтому необходимо разрабатывать конструкции фрез, которые возможно изготовить в условиях инструментального цеха отечественного производства при соблюдении предъявляющих к ним требований по точности и надежности.

Предлагаются конструкции блочно-модульных торцовых фрез (БМТФ), отличительными особенностями которых являются способ установки сменных режущих пластин в режущем инструменте [2], конструктивные исполнения блока резцового [3] и варианты его размещения в корпусе БМТФ [4].

Надежность и точность конструкции закрепления блока резцового в модуле корпусном и пластины режущей в блоке резцовом теоретически рассмотрены в [5].

**Основная часть.** Проведем сравнительный анализ конструкций БМТФ (рис. 1, а) и фрезы (рис. 1, б) Всероссийского научно-исследовательского института инструмента (ВНИИ инструмента).

**1. Базирование пластин режущих:**

- пластина режущая в блоке резцовом БМТФ базируется по плоскости, боковой поверхности и отверстию, что позволяет обеспечить наибольшую площадь контакта пластины с блоком резцовым и тем самым повысить жесткость данной конструкции;

- пластина режущая в резцовой вставке фрезы ВНИИ инструмента базируется по плоскости, отверстию и V-образному пазу, что, в отличие от конструкции БМТФ, обеспечивает контакт по линии касания пластины и паза, следовательно, жесткость этой конструкции будет меньше.

**2. Установка блока резцового (резцовой вставки) в корпус инструмента:**

- блок резцовый устанавливается в отверстие корпуса БМТФ и контактирует по цилиндрической поверхности с отверстием, что позволяет обеспечить лучшее центрирование блока резцового и увеличить жесткость конструкции;

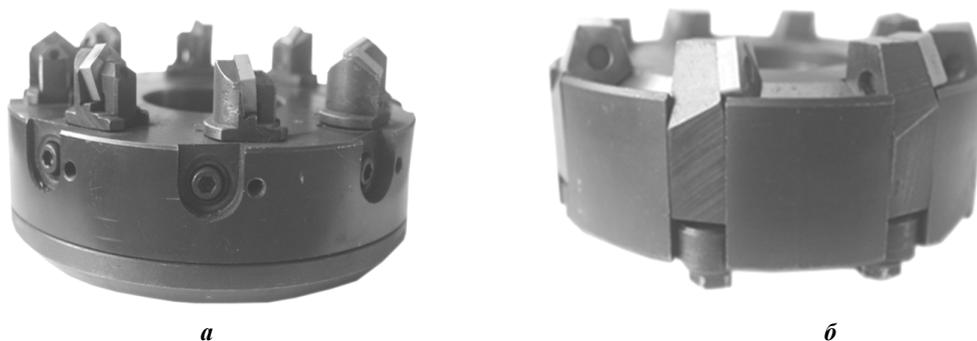
- резцовая вставка фрезы ВНИИ инструмента устанавливается по трем плоскостям, при этом одна грань резцовой вставки оказывается «не явной» базой, следовательно, у этой грани есть возможность перемещения, а это, в свою очередь, влечет за собой потерю жесткости и точности установки резцовой вставки в корпус фрезы.

**3. Зажим блока резцового (резцовой вставки):**

- сухари обеспечивают надежный зажим блока резцового в модуле корпусном БМТФ и исключают перемещения блока резцового во всех направлениях. Сухари расположены так, что силы зажима направлены по направлению сил резания, что позволяет ликвидировать зазоры в контактирующих поверхностях сухарей и блока резцового при общем колебании системы резания. Вместе с тем в корпусе БМТФ имеется регулировочный винт, которым возможно корректировать радиальное и торцовое биения в широких диапазонах, компенсируя тем самым погрешность изготовления блока резцового и пластин режущих;

- зажим резцовой вставки в корпусе фрезы конструкции ВНИИ инструмента происходит при помощи подпружиненного винта с тыльной стороны вставки, при этом винт выполняет функцию регулировочного элемента. Данная особенность конструкции не позволяет регулировать радиальное и торцовое биения в широких диапазонах, что не дает возможности компенсировать погрешности изготовления резцовых вставок или пластин режущих.

С целью определения работоспособности фрез были произведены сравнительные исследования основных характеристик обработки: уровня вибраций и шума в технологической системе, температуры в зоне резания, шероховатости обработанной поверхности. В ходе исследований ставилась задача по дальнейшему совершенствованию конструкции БМТФ для использования ее как на черновых, так и на чистовых операциях обработки с учетом высоких скоростей резания.



**а** – блочно-модульная фреза; **б** – фреза ВНИИ инструмента

**Рисунок 1. – Сборные торцовые фрезы**

Экспериментальные исследования проводились для двух конструкций сборных торцовых фрез – БМТФ и ВНИИ инструмента с одинаковым числом зубьев ( $z = 8$ ) и диаметрами фрез ( $D = 125$  мм). В обеих конструкциях использовались пятигранные неперетачиваемые быстросменные режущие пластины фирмы Sandvik-МКТС (марка твердого сплава PNEA CM30M).

Предварительно резовые блоки с закрепленными в них режущими пластинами БМТФ выставлялись на приборе модели БВ-2027 для настройки инструмента – размер в «нулевую» точку. Конструкция фрезы ВНИИ инструмента не позволяет проводить подобную регулировку, поэтому для данной конструкции было принято решение закреплять режущие пластины в резцовых вставках с одинаковым крутящим моментом на установочном винте. Данное решение может повлиять на равномерность работы режущих пластин, так как различные усилия зажима режущей пластины в резцовой вставке могут привести к выходу из строя одной из режущих пластин, а также резцовой вставки.

Согласно рекомендациям [6; 7] и в соответствии с технологическими возможностями вертикального консольно-фрезерного станка модели 6Р11:

- глубина резания  $t$ : 0,5, 1, 2, 3 мм;
- подача  $S$ : 85, 115, 170, 330 мм/мин;
- частота вращения шпинделя станка  $n$ : 500, 800, 1000, 1250 об/мин.

В каждой из серии опытов изменялся один из режимов резания, при этом два других оставались неизменными (для глубины резания – 1 мм; для подачи – 330 мм/мин; для частоты вращения – 500 об/мин).

В ходе исследований для каждого сочетания режимов резания измерялись:

- температура в зоне резания (в средней точке заготовки и на всей длине) при помощи пирометра «Optris LS»;
- уровень шума и вибраций технологической системы при помощи портативного виброметра-шумомера «Октава 110А»;
- шероховатость обработанных поверхностей с измерением среднего арифметического из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины ( $Ra$ ) и наибольшей высоты профиля ( $R_{max}$ ) с помощью профилометра-профилографа «Abris PM7».

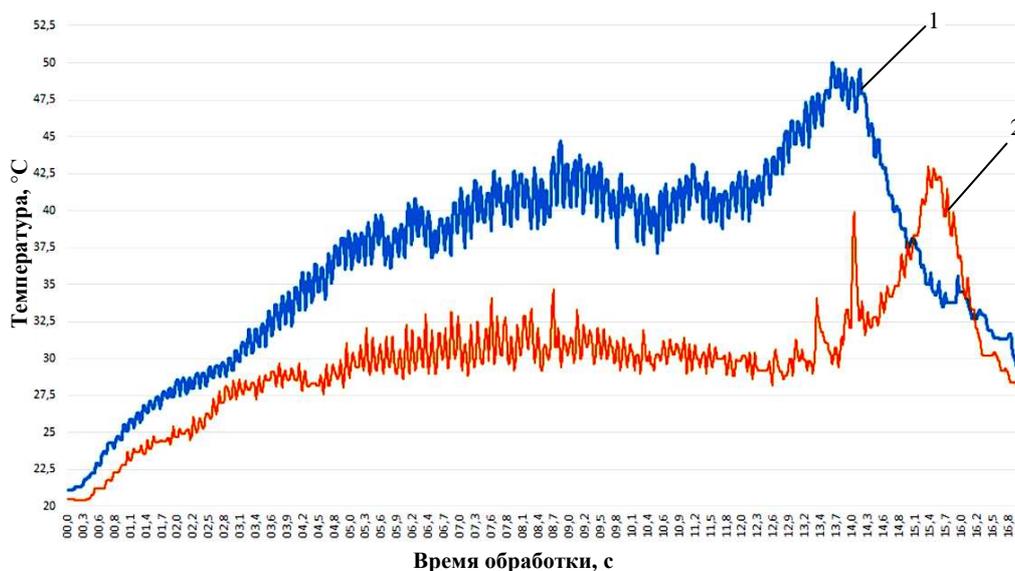
Результаты исследования температуры представлены в виде графиков в таблице 1\*, из которых видно, что средняя температура по всей длине заготовки и температура в средней точке заготовки при обработке БМТФ в среднем на 15...20% ниже, чем температура, зафиксированная при обработке фрезой ВНИИ инструмента. Соответственно, увеличение температуры резания при обработке фрезой ВНИИ инструмента приводит к увеличению силы резания и износа режущих пластин. Это можно объяснить тем, что из-за отсутствия возможности регулировки режущих пластин во фрезе ВНИИ инструмента процесс резания происходит неравномерно, следовательно, сопротивление резанию возрастает и возрастает температура резания. Возможность регулировки во фрезе БМТФ позволяет устранить данный недостаток, что и приводит к уменьшению температуры в зоне резания.

\* В проведении экспериментальных исследований принимал участие ст. преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства А.В. Сидикевич.

Таблица 1. – Графики зависимости средней температуры по всей длине заготовки и температуры в средней точке заготовки от режимов резания

Параметр режима резания	Эксперимент	Исследуемая характеристика	
		средняя температура по всей длине заготовки	температура в средней точке заготовки
Подача, $S$ , мм/мин	1		
Глубина резания, $t$ , мм	2		
Частота вращения шпинделя, $n$ , об/мин	3		

Пример графика-съемки приведен на рисунке 2.

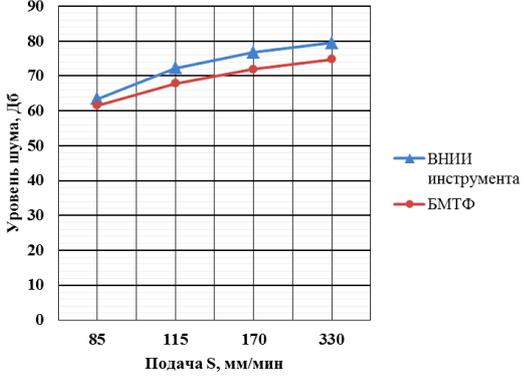
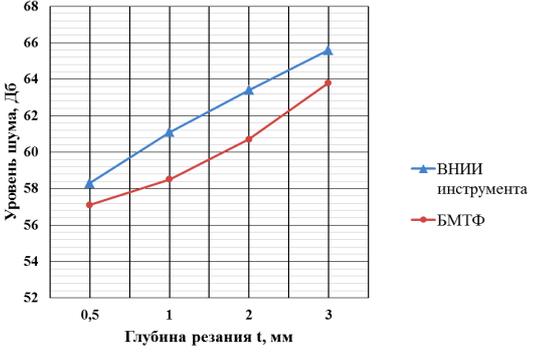
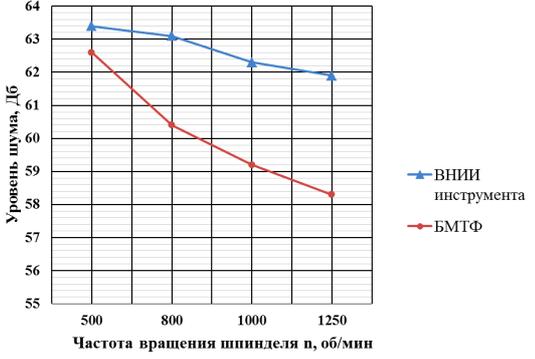


1 – фреза ВНИИ инструмента; 2 – блочно-модульная торцовая фреза

Рисунок 2. – Зависимость температуры от времени обработки заготовки ( $t = 1$  мм;  $S = 330$  мм/мин;  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>)

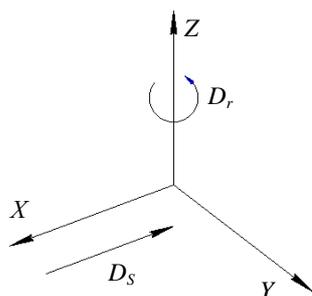
Графики зависимостей шумов в технологической системе от режимов резания представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Графики зависимостей шумов технологической системы от режимов резания

Режим резания	Зависимости уровня шума технологической системы от режима резания															
<p>Подача, <math>S</math>, мм/мин</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика 1: Уровень шума vs Подача S</caption> <thead> <tr> <th>Подача S, мм/мин</th> <th>ВНИИ инструмента (дБ)</th> <th>БМТФ (дБ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>85</td> <td>63</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>115</td> <td>71</td> <td>68</td> </tr> <tr> <td>170</td> <td>76</td> <td>71</td> </tr> <tr> <td>330</td> <td>79</td> <td>74</td> </tr> </tbody> </table>	Подача S, мм/мин	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)	85	63	61	115	71	68	170	76	71	330	79	74
Подача S, мм/мин	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)														
85	63	61														
115	71	68														
170	76	71														
330	79	74														
<p>Глубина резания, <math>t</math>, мм</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика 2: Уровень шума vs Глубина резания t</caption> <thead> <tr> <th>Глубина резания t, мм</th> <th>ВНИИ инструмента (дБ)</th> <th>БМТФ (дБ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,5</td> <td>58</td> <td>57</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>61</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>64</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>66</td> <td>64</td> </tr> </tbody> </table>	Глубина резания t, мм	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)	0,5	58	57	1	61	59	2	64	61	3	66	64
Глубина резания t, мм	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)														
0,5	58	57														
1	61	59														
2	64	61														
3	66	64														
<p>Частота вращения шпинделя, <math>n</math>, об/мин</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика 3: Уровень шума vs Частота вращения шпинделя n</caption> <thead> <tr> <th>Частота вращения шпинделя n, об/мин</th> <th>ВНИИ инструмента (дБ)</th> <th>БМТФ (дБ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500</td> <td>63</td> <td>62</td> </tr> <tr> <td>800</td> <td>62</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>62</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>1250</td> <td>61</td> <td>58</td> </tr> </tbody> </table>	Частота вращения шпинделя n, об/мин	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)	500	63	62	800	62	60	1000	62	59	1250	61	58
Частота вращения шпинделя n, об/мин	ВНИИ инструмента (дБ)	БМТФ (дБ)														
500	63	62														
800	62	60														
1000	62	59														
1250	61	58														

Как видно из представленных графиков, уровень шума технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД) при обработке БМТФ в среднем ниже на 5...10%, чем при обработке фрезой ВНИИ инструмента. Это свидетельствует о том, что при обработке БМТФ процесс резания проходит более плавно за счет более высокой точности позиционирования режущих пластин в корпусе инструмента, а следовательно, большей жесткости системы СПИД за счет увеличения жесткости блочно-модульной фрезы по сравнению с фрезой ВНИИ инструмента.

Система расположения координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  при измерении вибраций на станке представлена на рисунке 3. При этом ось  $Y$  является неподвижной в процессе обработки, ось  $Z$  совпадает с осью вращения инструмента (шпинделя станка) и главного движения резания ( $D_r$ ), а ось  $X$  совпадает с продольным перемещением стола фрезерного станка и с направлением движения подачи ( $D_s$ ). Графики зависимостей вибраций в технологической системе от режимов резания представлены в таблице 3.



а



б

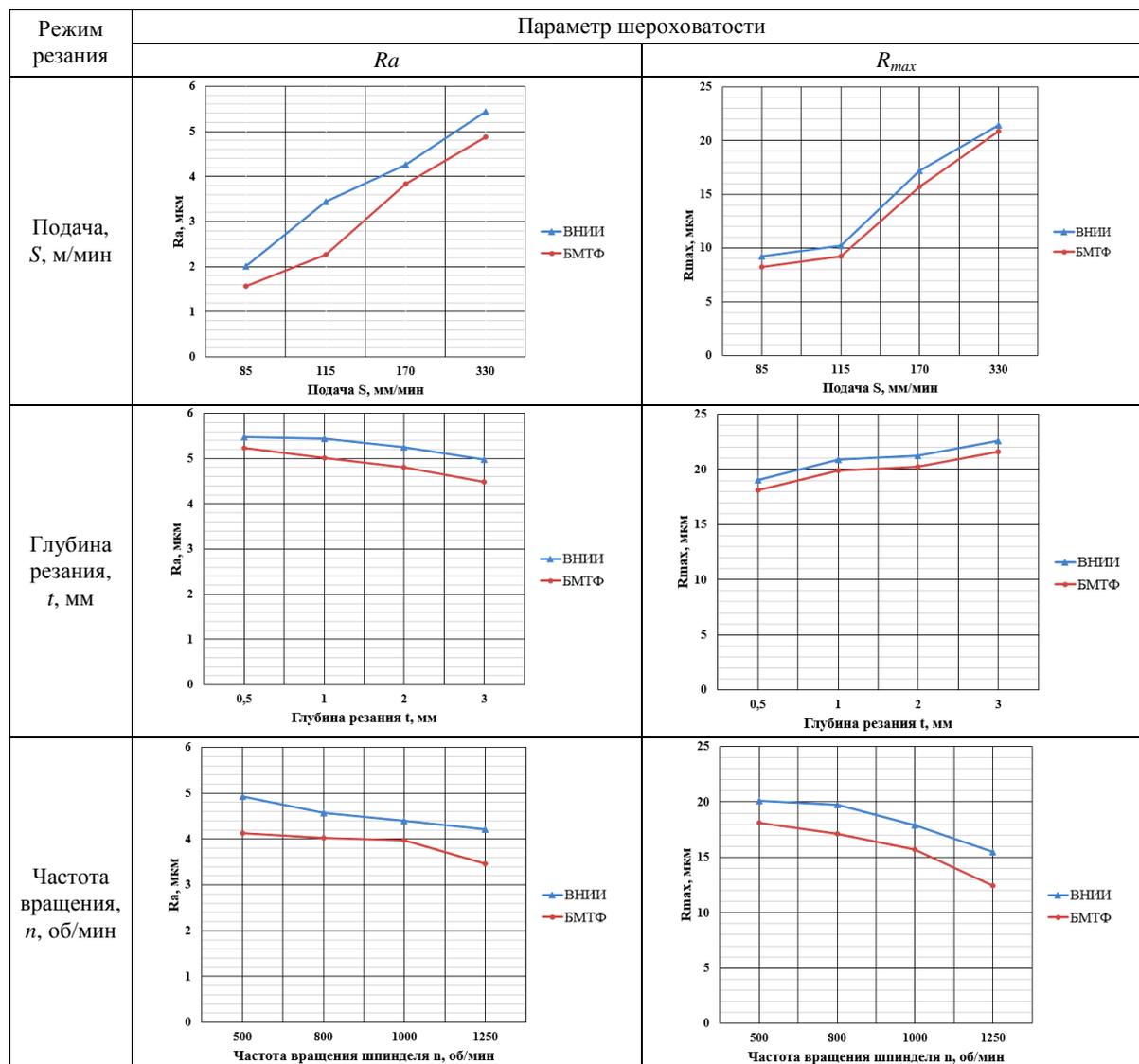
Рисунок 3. – Система расположения координат  $X, Y, Z$  (а) при измерении вибраций на станке (б)

Таблица 3. – Графики зависимостей вибраций технологической системы в соответствующих осях координат от режимов резания

Режим резания	Зависимости вибраций технологической системы от режима резания		
	по оси $X$	по оси $Y$	по оси $Z$
1 Подача, $S$ , мм/мин			
2 Глубина резания, $t$ , мм			
3 Частота вращения шпинделя, $n$ , об/мин			

Как видно из представленных графиков, вибрации технологической системы СПИД при обработке БМТФ в среднем ниже на 10...15%, чем при обработке фрезой ВНИИ инструмента. При этом переменным звеном системы СПИД являлся режущий инструмент; соответственно, вибрации остальных составляющих (станок – приспособление – деталь) являлись постоянными. Следовательно, основное влияние на вибрацию в процессе резания оказывали фрезы. Более высокие показатели значений вибраций технологической системы при обработке фрезой ВНИИ инструмента можно объяснить отсутствием возможности регулировки режущих пластин в резцовых вставках, а также ее меньшей жесткостью по сравнению с блочно-модульной фрезой.

Результаты исследования влияния подачи, глубины резания и частоты вращения инструмента на параметры шероховатости при обработке торцовыми фрезами представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Графики зависимостей среднего арифметического из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины ( $R_a$ ) и наибольшей высоты профиля ( $R_{max}$ ) от режимов резания

Как видно из представленных графиков, значения  $R_a$  и  $R_{max}$  поверхностей, обработанных БМТФ, в среднем на 10...15% меньше, чем для поверхностей, обработанных ВНИИ. Это объясняется меньшими значениями упругих и пластических деформаций в зоне резания в случае обработки блочно-модульной фрезой, имеющей более высокую жесткость и точность.

На основании анализа конструкций фрез и проведенных исследований разработаны следующие рекомендации по совершенствованию конструкции блочно-модульной торцевой фрезы:

1) для увеличения жесткости конструкции и расширения диапазона регулирования предлагается «утопить» блок резцовый в корпусе инструмента с упором в буртик. Данный вариант конструкции позволит использовать фрезу для полустивовой и черновой обработки в зависимости от точности настройки торцевого биения регулировочным винтом и радиального биения поворотом блока;

2) выполнить модуль корпусный с улучшенными аэродинамическими свойствами – обтекаемой формы. Данный вариант конструкции позволит использовать фрезу на больших скоростях резания, при этом, как и в описанном выше варианте, за счет регулировки использовать фрезу для чистовой и полустивовой обработки;

3) для обеспечения плавности работы и увеличения равномерности фрезерования предлагается увеличить число зубьев фрезы до 12.

Согласно рекомендациям изготовлен опытный образец фрезы (рис. 4) с «утопленными» блоками и механизмом регулировки, как у БМТФ, используемой для экспериментальных исследований, также

был изготовлен макет фрезы БМТФ обтекаемой формы из полимерного материала (рис. 5) с использованием технологий трехмерной печати.



**Рисунок 4. – Опытный образец БМТФ с «утопленными» блоками**



**Рисунок 5. – Макет БМТФ обтекаемой формы, выполненный с применением трехмерной печати**

**Закключение.** Макет БМТФ позволяет оценить эргономические и аэродинамические свойства фрезы; определить преимущества и недостатки технологии сборки; трудоемкость конструкторской и технологической подготовки производства фрез традиционными методами и с использованием 3D-печати; выработать рекомендации по изготовлению торцовых фрез с использованием трехмерных технологий при переходе на металлические материалы (силуминовые и титановые сплавы).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем : в 3-х ч. / Н.Н. Попок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – Ч. 3 : Инструментальные системы для многоцелевой обработки. – С. 19–37.
2. Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте : пат. ВУ 19260 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков. – Выдано 2014.12.12.
3. Режущий инструмент : пат. ВУ 5407 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков. – Выдано 2014.12.12.
4. Многолезвийный блочно-модульный режущий инструмент : пат. ВУ 563 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев. – Выдано 2002.06.30.
5. Попок, Н.Н. Совершенствование системы закрепления пластин режущих и блоков резцовых в блочно-модульных режущих инструментах / Н.Н. Попок, А.С. Максимчук, С.А. Портянко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 16–22.
6. Фрезы торцовые нерегулируемые с клиновым креплением многогранных твердосплавных пластин. Технические условия : ГОСТ 26596-91. – М. : Стандартинформ, 2010. – 6 с.
7. Инструмент металлорежущий. Правила приёмки : ГОСТ 23726-79. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 7 с.

Поступила 06.02.2017

#### IMPROVING THE DESIGN OF BLOCK-MODULAR FACE MILLS BASED ON THE RESEARCH OF CUTTING PROCESS CHARACTERISTICS

**N. POPOK, S. PORTSIANKO, A. MAKSIMCHUK**

*The problem of improving the design of block-modular face mills based on research of cutting process characteristics is investigated. The results of experimental research of temperature in the cutting zone, noise and vibrations of the technological system, roughness of the treated surface depending on the cutting conditions are presented. Based on the obtained data an experimental model (layout) of the milling cutter using modern 3D-printing technology for high-precision machining of flat surfaces was made.*

**Keywords:** cutting conditions, cutting tool, machining, 3D-modeling, rapid prototyping.

УДК 621.01

## ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДВУХКРИВОШИПНЫХ ВОСЬМИЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ С ВЫСТОЕМ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА НА ОСНОВЕ ТОЧЕК РАСПРЯМЛЕНИЯ 5-ГО ПОРЯДКА

*канд. техн. наук, доц. В.А. ХАРЖЕВСКИЙ  
(Хмельницкий национальный университет, Украина)*

*Рассматривается кинематический синтез двухкривошипных рычажных восьмизвенных механизмов, обеспечивающих периодическую остановку (выстой) выходного звена заданной продолжительности. Проектирование таких механизмов является важной практической задачей, поскольку они используются в различных областях машиностроения, а одним из эффективных направлений их синтеза является использование методов кинематической геометрии. Определены области существования таких механизмов по заданной продолжительности и точности выстоя с учетом дополнительных параметров, в частности положения шатунной точки, которое определяет габариты проектируемого механизма, а также максимальный ход выходного звена.*

**Ключевые слова:** *двухкривошипные восьмизвенные механизмы, кинематическая геометрия, выстой.*

**Введение.** Механизмы с периодической остановкой (выстоем) выходного звена при непрерывном вращательном движении входного звена широко используются в различных областях современного машиностроения. Поэтому разработка методов синтеза механизмов, которые по циклограмме должны обеспечивать один либо несколько приближенных выстоев, является актуальной задачей. В частности, как указывается в работе [1], большинство приводных механизмов технологических машин легкой промышленности должны обеспечивать движение рабочих органов, у которых циклограмма включает хотя бы один выстой, в процессе которого осуществляются рабочие операции (например, в трикотажных машинах – прокладывается нить, в упаковочных – наклеивается этикетка).

Для обеспечения выстоя заданной продолжительности часто используются механизмы, в состав которых входят высшие кинематические пары, в частности, кулачковые механизмы, мальтийские механизмы, механизмы неполнозубых колес и другие. Однако известно, что при определенном соотношении длин звеньев данная задача может быть решена с помощью рычажных механизмов, в состав которых входят только низшие кинематические пары (вращательные либо поступательные), которые являются более надежными и долговечными. Кроме того, использование рычажных механизмов позволяет значительно увеличить рабочие скорости машин и их производительность, что особенно важно при проектировании современных машин-автоматов [1–3].

Однако использование рычажных механизмов на практике ограничивается достаточно сложным их синтезом, который представляет собой одну из наиболее трудных задач в теории механизмов и машин. Одним из направлений такого синтеза является использование базовых круговых и прямолинейно-направляющих механизмов, которые кроме того имеют также самостоятельное применение в машиностроении [2; 4; 5]. Таким образом, в качестве основной задачи синтеза механизма с выстоем выступает именно синтез базового направляющего механизма.

Как известно [2; 3; 6], существует два направления синтеза рычажных направляющих механизмов: в первом случае используются условия наилучшего приближения по Чебышеву, что отражено, в частности, в работах Блоха, Функа (Funk), Гассманна (Gassmann) [5], Киницкого [4], а во втором – методы кинематической геометрии, основы которой были сформулированы немецким ученым Бурместером и получили дальнейшее развитие в работах Мюллера (Müller), Лихтенхельдта (Lichtenheldt), Бейера (Beyer), Ина (Yin) [7], Хана (Han) и ряда других ученых. Детальный обзор современного состояния синтеза рычажных направляющих механизмов и построенных на их основе механизмов с выстоем выходного звена приведен в одной из последних работ Уанга (Wang) [3].

**Основная часть.** В представляемой работе для проектирования механизмов с выстоем будут использованы методы кинематической геометрии бесконечно близких положений. Основной их принцип сводится к поиску таких особых точек шатунной плоскости механизма, при принятии которых в качестве шатунных они будут вычерчивать кривые, имеющие участок приблизительно постоянной кривизны, следовательно, получаем приближение к дуге окружности либо к прямой линии, т.е. синтезируем направляющий механизм. Такими особыми точками, как известно, являются: точки Болла [2; 7; 8]; Бурместера [7; 9]; Чебышева [10]; точки распрямления 4-го [2] и 5-го порядка. Синтез механизмов с выстоем выходного звена на основе точек распрямления 5-го порядка рассматривался нами, в частности, в работах [11; 12], причем в качестве одного из способов изменения продолжительности выстоя выходного звена в широких



Исходными параметрами для синтеза являются длины звеньев базового направляющего механизма: кривошипа  $r = l_{OA}$ , шатуна  $b = l_{AB}$ , коромысла  $c = l_{BC}$ , двух дополнительных звеньев: кривошипа  $r_2 = l_{FG}$ , шатуна  $b_2 = l_{GH}$ , а также расстояние  $c_2 = l_{OH}$ , причем  $l_{FO} = 0,2$ . Все размеры являются относительными, в качестве модуля длины, как и в работах [2; 6; 8–13], принято расстояние между осями неподвижных шарниров механизма  $d = l_{OC} = 1$ .

Задача кинематического синтеза рассматриваемого механизма состоит, прежде всего, в поиске соответствующего положения точки  $D$  в шатунной плоскости  $ABD$  механизма. Оно должно быть таким, чтобы шатунная кривая этой точки имела приблизительно прямолинейный участок  $D'D''$  некоторой продолжительности. В соответствии с теоретическими положениями кинематической геометрии [2; 3; 6] геометрическим местом точек шатунной плоскости, которые являются распрямлениями либо перегибами своих траекторий, служит поворотная окружность, уравнение которой в неявном виде представим так:

$$\omega^2 (x^2 + y^2) - (x_0''x + y_0''y) = 0, \tag{1}$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения шатунной плоскости  $ABD$ ;  $x_0'', y_0''$  – ускорение полюса  $P$  мгновенного вращения шатунной плоскости  $ABD$ . Заметим, что все построения в кинематической геометрии относятся только к определенному положению механизма, которое определяется углом  $\varphi_1$  поворота кривошипа базового прямолинейно-направляющего механизма  $OABCD$ . Используя уравнение (1), можно определить положение центра поворотной окружности и ее диаметр:

$$x_{C_0} = x_0''/2\omega^2; y_{C_0} = y_0''/2\omega^2; d_k = \sqrt{x_0''^2 + y_0''^2} / \omega^2. \tag{2}$$

В соответствии с рекомендациями [6], при проведении расчетов целесообразно принять угловую скорость шатунной плоскости постоянной и равной единице ( $\omega = 1$ ), а также повернуть базовую систему координат  $xOy$  в положение  $x_1Py_1$  таким образом, чтобы ось абсцисс была направлена вдоль полюсной касательной, а центр выбрать в полюсе  $P$  мгновенного вращения шатунной плоскости  $ABD$  (см. рис. 1). Таким образом, ускорение полюса  $P$  будет направлено вдоль полюсной нормали, а величина  $x_0'' = 0$ , что позволит упростить расчеты.

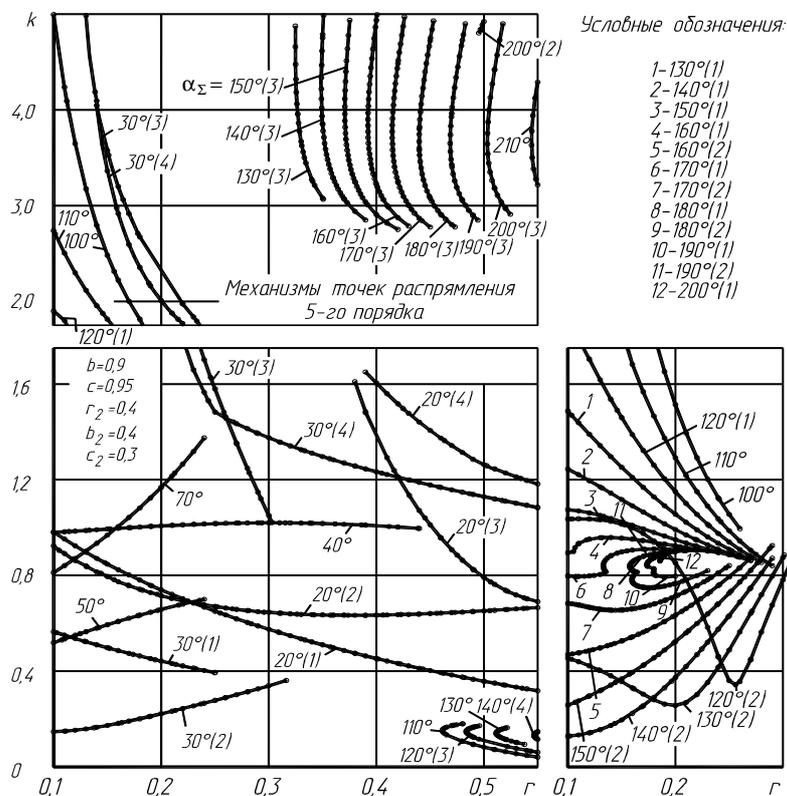


Рисунок 2. – Справочная карта для определения длины второго плеча шатуна  $k = l_{BD}$  в зависимости от длины кривошипа  $r = l_{OA}$  по заданной продолжительности выстоя

В работе [11] показано, что для синтеза прямолинейно-направляющего механизма может быть использована точка распрямления 5-го порядка. Эта точка является точкой кривой (1) и одновременно принадлежит также кривой геометрического места точек, шатунные кривые которых обеспечивают в данной точке касание 5-го порядка со своими касательными окружностями. Для определения координат таких точек рассмотрим уравнение этой кривой в параметрическом виде. Для этого, используя точку  $P$  (полюс мгновенного вращения) в качестве начала системы координат, проведем радиус-вектор  $R$  под углом  $\delta$ , который будет изменяться в пределах от 0 до  $2\pi$ . Тогда любая точка кривой геометрического места точек, обеспечивающих касание 5-го порядка, будет определяться двумя параметрами – радиус-вектором  $R$  и углом  $\delta$  (см. рис. 1) в соответствии с уравнением

$$\omega^2 y = x \operatorname{tg} \delta. \tag{3}$$

Уравнение кривой геометрического места точек с касанием 5-го порядка в параметрическом виде можно записать так [13]:

$$\frac{x^3}{\cos^2 \delta} \left[ (y_0^V - 5u_2) \operatorname{tg} \delta + x_0^V + 5u_1 \right] + 5x^2 \left[ \operatorname{tg}^2 \delta (u_2 y_0'' + u_3) - u_1 y_0'' \operatorname{tg} \delta + u_3 \right] - 5x y_0'' u_3 \operatorname{tg} \delta = 0, \tag{4}$$

где коэффициенты  $u_1, u_2, u_3$  определяются следующим образом:

$$u_1 = y_0^{IV} - 2x_0''' - 2y_0''; \quad u_2 = x_0^{IV} + 2y_0''; \quad u_3 = 2y_0'' y_0''', \tag{5}$$

где  $x_0^{IV}, y_0^{IV}, x_0^V, y_0^V$  – производные соответственно 4-го и 5-го порядков от перемещения полюса  $P$ .

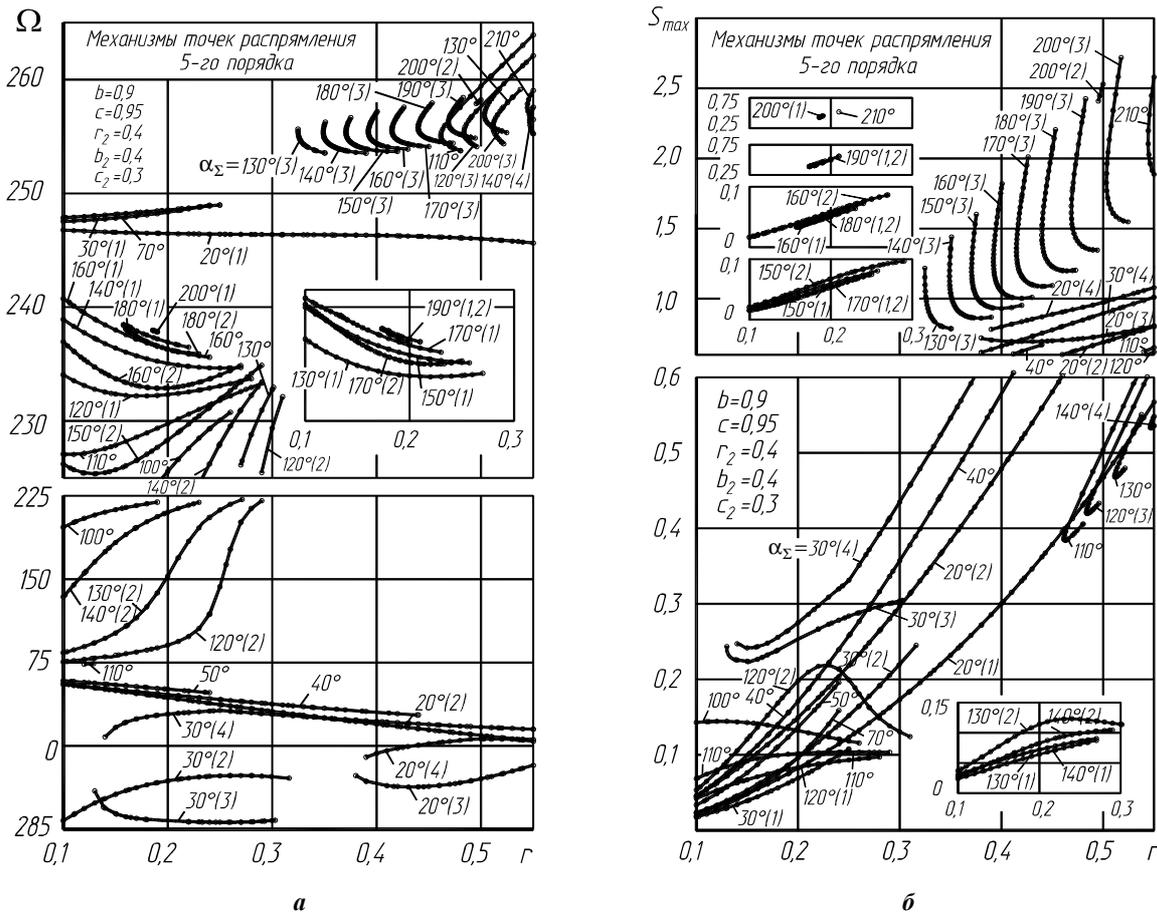


Рисунок 3. – Справочные карты для определения угла излома шатуна  $\Omega$  (а), а также максимального хода выходного звена  $S_{\max}$  (б) по заданной продолжительности выстоя  $\alpha_2$

Используя уравнения (1)–(5), для заданного положения механизма можно построить поворотную окружность и кривую геометрического места точек, обеспечивающих касание 5-го порядка. Как указано в работе [11], эти кривые в общем виде имеют две точки пересечения, одна из которых является полю-

сом  $P$  мгновенного вращения шатунной плоскости, а другая – искомой точкой распрямления 5-го порядка, координаты которой определяются следующим образом [11]:

$$x_T = \frac{-y_0'' x_0^V y_0^V}{(x_0^V)^2 + (y_0^V)^2}; \quad y_T = \frac{-y_0'' (x_0^V)^2}{(x_0^V)^2 + (y_0^V)^2}, \quad (6)$$

Если принять найденную точку распрямления 5-го порядка  $T$  в качестве шатунной точки  $D$  механизма, получим прямолинейно-направляющий механизм  $OABCD$ , для которого по заданной шатунной точке можно определить длину второго плеча шатуна  $k = l_{BD}$  и угол его излома  $\Omega$ . Такой механизм может быть базовым для проектирования механизма с выстоем выходного звена. Для определения фактической продолжительности выстоя в таких механизмах можно использовать разработанный ранее численный метод [2] с использованием коэффициента предельной скорости выходного звена. Однако, как указывалось, важной практической задачей является кинематический синтез таких механизмов по заданной величине выстоя. Для этого методом итерации численно определены такие геометрические параметры механизмов, которые соответствуют кратным значениям углов выстоя  $\alpha_\Sigma = 20^\circ, 30^\circ, \dots, 210^\circ$ .

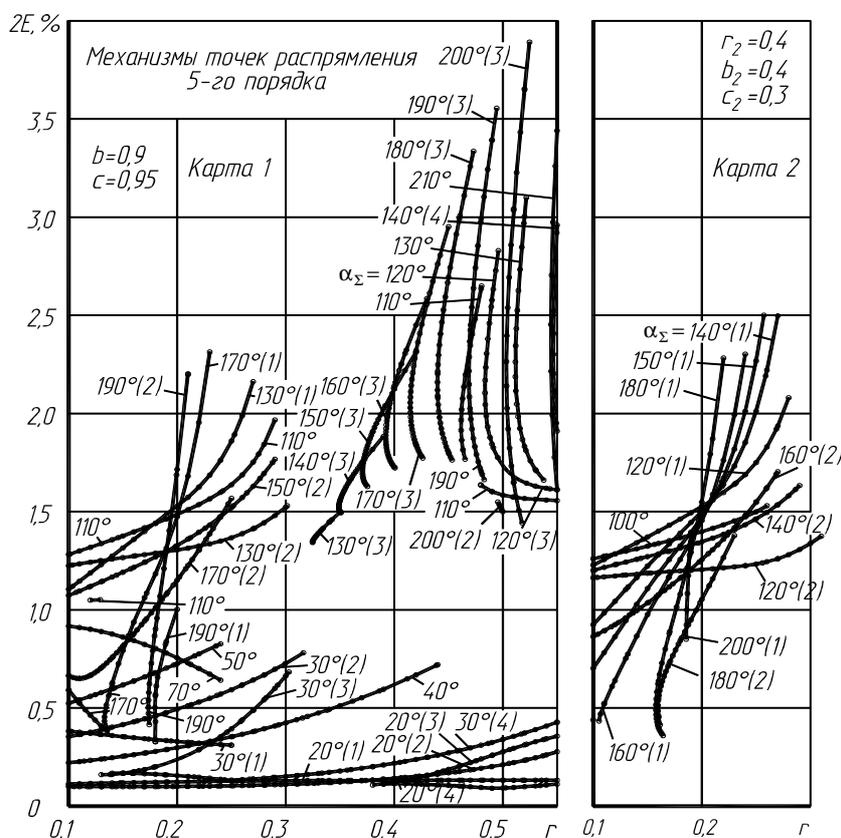


Рисунок 4. – Справочная карта для определения точности выстоя  $2E$  по заданной его продолжительности  $\alpha_\Sigma$

Установлено, что параметры механизмов с одинаковыми значениями выстоев представляют собой определенные функциональные зависимости, которые формируют области существования таких механизмов. Причем определенной продолжительности выстоя могут соответствовать несколько кривых (см. рис. 2–4), в таком случае для однозначного определения параметров механизмов на различных справочных картах номера кривых указываются в скобках. Разработанные алгоритмы и соответствующее программное обеспечение для построения таких областей позволяет инженерам-конструкторам достаточно просто выбирать геометрические параметры подобных механизмов, причем не только по заданной продолжительности выстоя (что зачастую является основным требованием к механизму), но и учитывая дополнительные параметры. К таким параметрам можно отнести, в частности, габаритные размеры механизма, которые определяются положением шатунной точки  $D$  и, соответственно, длиной второго плеча шатуна  $k$  (см. рис. 2) и углом его излома  $\Omega$  (см. рис. 3, а). Кроме того, важным конструктивным параметром механизма является максимальный ход выходного звена  $S_{max}$  (см. рис. 3, б), который зачастую зада-

ется при проектировании механизма. Для оценки теоретической точности проектируемых механизмов можно воспользоваться справочной картой максимальных отклонений выходного звена  $2E$  в фазе останова, причем отклонения рассчитываются в процентах от максимального хода выходного звена  $S_{\max}$ .

Предлагаемые механизмы обеспечивают достаточно высокую точность выстоя выходного звена, что видно из рисунка 4. Используя предложенные методы синтеза, проведены расчеты и сформирована база данных геометрических параметров механизмов, что позволяет проводить оптимизационный поиск по различным критериям, в том числе учитывая их основные кинематические параметры.

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработан численно-аналитический метод синтеза рычажных двухкривошипных восьмизвенных механизмов, которые, как показано, могут обеспечить выстой выходного звена в широких пределах. Исследования планируется продолжить в направлении проведения оптимизационного синтеза таких механизмов с учетом их кинестатических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кикин, А.Б. Разработка методов и средств для структурно-кинематического проектирования рычажных механизмов машин легкой промышленности: дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А.Б. Кикин ; С.-Петерб. гос. ун-т технологий и дизайна. – СПб., 2006. – 362 с.
2. Харжевський, В.О. Синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки методами кінематичної геометрії / В.О. Харжевський. – Хмельницький : ПВЦ ХНУ, 2015. – 223 с.
3. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / D. Wang, W. Wang. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.
4. Киницкий, Я.Т. Шарнирные механизмы Чебышева с выстоем выходного звена / Я. Т. Киницкий. – К. : Вища школа, 1990. – 232 с.
5. Gassmann, V. Synthese von Geradführungen mit ebenen Viergelenkgetrieben / V. Gassmann. – Hamburg : Universität der Bundeswehr Diss., 2000. – 102 p.
6. Артоболевский, И.И. Синтез плоских механизмов / И.И. Артоболевский, Н.И. Левитский, С.А. Черкудинов. – М. : Физматгиз, 1959. – 1084 с.
7. Yin, L. A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points / L. Yin, [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 215–216. – P. 138–141.
8. Харжевський, В.О. Синтез механізмів із зупинкою вихідної ланки на основі двокривошипного шарнірного чотириланкового механізму / В.О. Харжевський // Зб. наук. праць. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ ім. Б. Хмельницького. – 2004. – № 28, ч. 1 (спец. вип.). – С. 123–125.
9. Харжевський, В.О. Аналітично-числовий синтез кругових напрямних механізмів на базі шарнірного чотириланкового механізму з використанням точок Бурместера / В.О. Харжевський, Я.Т. Киницкий // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 26–31.
10. Харжевський, В.О. Методика визначення особливих точок Чебишева для синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів / В.О. Харжевський // Вісник Хмельниц. нац. ун-ту. – 2015. – № 3(225). – С. 34–41.
11. Харжевський, В.О. Метод синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів з використанням точок розпрямлення 5-го порядку / В.О. Харжевський // Вісник Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки. – 2015. – № 5(229). – С. 62–67.
12. Харжевський, В.О. Кінематичний синтез важільних восьмиланкових механізмів із зупинкою на базі точок розпрямлення 5-го порядку / В.О. Харжевський // Вісник Хмельниц. нац. ун-ту. – 2016. – № 3(237). – С. 168–171.
13. Харжевський, В.О. Розробка та вдосконалення методів кінематичної геометрії для синтезу важільних напрямних механізмів / В.О. Харжевський // Вісник Хмельниц. нац. ун-ту. – 2015. – № 4(227). – С. 10–16.

Поступила 22.11.2016

#### THE AREAS OF EXISTENCE OF DOUBLE-CRANKED EIGHT-LINKED DWELL LINKAGE MECHANISMS ON THE BASIS OF 5<sup>TH</sup> ORDER STRAIGHTENING POINTS

V. KHARZHEVSKYI

*The article deals with the problem of kinematic synthesis of double-cranked eight-linked dwell linkage mechanisms at the given duration of the dwell period. The designing of such mechanisms is an important practical task due to their application in different fields of machinery. One of the direction of their effective synthesis is the usage of kinematic geometry methods. As a results of carried researches, the areas of parameters' existence of these mechanisms at the given duration and accuracy of the dwell period are found out, taking into account additional parameters such as the position of the coupler point, which defines the overall dimensions of the mechanism, and maximum displacement of the output link.*

**Keywords:** two point vosmitonny mechanisms, kinematic geometry, dwell.

УДК 621.793.620.172

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ИХ СВОЙСТВА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ***канд. техн. наук, доц. М.А. АГЕЕВ**(Херсонская государственная морская академия, Украина);**канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА**(Полоцкий государственный университет);**К.А. ДАНЬКО**(Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, Харьков, Украина);**С.А. ДОВЖУК**(Кировоградский национальный технический университет, Украина);**С.Л. ЧИГРАЙ, А.В. ЛОПАТА**(Национальный технический университет «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, Украина)*

На основе экспериментальных исследований и с использованием методов математического моделирования представлена комплексная оценка влияния дистанции газотермического напыления, толщины покрытия и условий их эксплуатации (давления и скорости скольжения) на прочность сцепления и интенсивность изнашивания покрытий. Многофакторный эксперимент с определенным варьированием технологических (дистанция напыления), конструкторских (толщина покрытий) и эксплуатационных (давление и скорость скольжения) факторов процесса газотермического напыления позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий. Сделан вывод, что для повышения прочности сцепления газотермических покрытий и уменьшения интенсивности их изнашивания целесообразно комплексно использовать влияние технологических (дистанция напыления), конструкторских (толщина покрытий) и эксплуатационных (нагрузка и скорость скольжения) факторов процесса газотермического напыления.

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, газотермические покрытия, прочность сцепления, эксплуатационные факторы, износостойкость.

**Состояние и актуальность проблемы.** Неаддитивное влияние на детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС) эксплуатационных факторов представляет собой сложный процесс, который зависит от их величины. В связи с этим целесообразно исследовать материалы с покрытиями. С развитием технологий нанесения покрытий методами газотермического напыления (ГТН) и ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих при ГТН, в настоящее время не существует аналитических зависимостей, которые позволили бы описать и всесторонне изучить этот процесс. Это приводит к тому, что эксперимент становится одним из основных средств получения информации о процессе.

Экспериментально-статистический метод – один из главных инструментов в технологических и конструкторских разработках. При отработке технологии ГТН-покрытий экспериментальные исследования проводят на образцах, так как непосредственное нанесение покрытий на детали и испытание их на реальных объектах – трудоемкий и дорогостоящий процесс. Разработка технологического процесса ГТН-покрытий связана с решением оптимизационных задач [1; 2]. Вопросы оптимизации занимают ключевое место [1; 2]. Это объясняется тем, что большое количество технологических параметров процесса ГТН в сочетании с обширной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, предоставляют технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принимаемых решений зависит от выбора свойств покрытий, удобных для управления технологическим процессом ГТН, позволяющим увеличить ресурс двигателя при заданных условиях эксплуатации. Ресурс (интенсивность износа, срок службы) поверхностей деталей ДВС с ГТН-покрытиями зависит от их качественных характеристик, которые влияют на интенсивность срабатывания, твердость покрытия, его пористость, прочность сцепления, износостойкость. Исследования [3] работоспособности деталей с покрытиями показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и восстанавливаемой поверхностью. Другими словами, одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик деталей с ГТН-покрытиями является прочность сцепления покрытия – критерий, который используют в практике создания деталей с покрытиями [4; 5]. Адгезионные и когезионные характеристики покрытия определяют его работоспособность [6]. При оптимизации режимов процесса ГТН в качестве основных факторов, определяющих качество деталей с покрытиями, были выбраны дистанция напыления (технологические факторы), толщина покрытия (конструкторские факторы), давление и скорость скольжения (эксплуатационные факторы).

**Цель исследований** – обеспечить максимальный срок службы деталей ДВС с ГТН-покрытиями путем оценки влияния параметров процесса ГТН на свойства покрытий и оптимизации режимов ГТН, которые позволяют при минимальных временных и финансовых затратах на экспериментальные исследования получить достаточный объем информации об изучаемом процессе.

**Методология исследований. Принцип и предпосылки ее разработки.** Методология научно-экспериментальных исследований предназначена для сокращения объема экспериментальных работ, получения максимальной информации и предполагает использование комплекса экспериментально-статистических и вычислительных методов исследований. Эти методы позволяют определить оптимальные технологические режимы ГТН, с помощью которых можно получить покрытие с заданными свойствами и обеспечить оптимальное соотношение прочностных характеристик в композиции «основа – покрытие», а именно максимальную прочность. То есть технологию нанесения покрытий ГТН следует рассматривать как способ управления свойствами поверхностного слоя. При этом конструирование материала типа «основа – покрытие» базируется не только на соотношении свойств покрытия с условиями эксплуатации, но и на соотношении свойств покрытия со свойствами основы.

В представляемой работе разработана общая методология, которая базируется на применении системного подхода к решению научной проблемы и математического моделирования процесса ГТН, с целью изучения особенностей процесса напыления, установления закономерностей влияния параметров ГТН на свойства и структуру получаемых покрытий, на выбор оптимальных режимов ГТН и разработку технологического процесса (ТП) нанесения ГТН-покрытий. основополагающим принципом и предпосылкой разработки методологии научно-экспериментальных исследований ГТН-покрытий являются системность и комплексный характер исследования их свойств, принципы моделирования (содержательный анализ, формализованное описание, исследование и выбор оптимального варианта). Исходя из системного подхода организация исследования представляет собой иерархическую структуру таких методологических уровней:

- *проблемный анализ* – предполагает выяснение сущности и актуальности проблемы, определение цели исследования и постановку задач;
- *концептуальный уровень* – включает анализ системного окружения, выделение из него ТП;
- *операционный уровень* – предполагает проведение функционально-морфологического анализа, выбор режимов ТП и разработку его математических моделей;
- *детальный уровень* – включает выбор оптимальных вариантов ТП;
- *завершающий этап* – принятие решения по выбору оптимальных параметров ТП, которые позволяют решить научную проблему.

**Математическое описание и разработка математических моделей технологического процесса нанесения газотермических покрытий.** Для эффективного анализа механизма явлений и управления технологическим процессом ГТН-покрытий (объектом исследования) необходимо выявить взаимосвязь факторов, определяющих ход процесса, и представить их в количественной форме – в виде математической модели. Модель позволяет получить информацию о процессе, который протекает в объекте, рассчитать характеристики объекта. Реальный технологический процесс ГТН сложен, а явления, его сопровождающие, разнообразны, поэтому математической моделью объекта исследования может быть совокупность соотношений вида:

$$Y = f(X_i, V_j, Z_k), \quad (1)$$

где  $X_i$  – совокупность значений входных параметров, контролируемых и управляемых;  $V_j$  – совокупность значений контролируемых, но не управляемых, параметров;  $Z_k$  – совокупность параметров, не управляемых и не контролируемых.

Однако практически при построении модели соотношения (2) получить невозможно [7]. Поэтому необходимо вводить ограничения, то есть каждый из параметров может меняться в определенных пределах, обусловленных нижней и верхней границами:

$$X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}, \quad V_{jH} \leq V_j \leq V_{jB}, \quad Z_{kH} \leq Z_k \leq Z_{kB}. \quad (2)$$

Задача исследований заключается в том, чтобы при фиксированных параметрах выбрать такую рабочую точку в области работоспособности, при которой выходной параметр (или параметр оптимизации) объекта  $Y$  достигает оптимальной величины. Иными словами, необходимо оптимизировать функцию

$$Y = f_{opt}(X_i = \text{var}; V_j = \text{const}; Z_k = \text{const}) \text{ при } X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}. \quad (3)$$

Математическая модель объекта есть функция отклика, которая связывает параметр оптимизации  $Y$ , характеризующий результаты эксперимента, с переменными параметрами, которыми варьируют:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k). \quad (4)$$

Независимые переменные  $X_i$  принято называть факторами, координатное пространство с координатами  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$  – факторным пространством, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве – поверхностью отклика. При недостаточных знаниях о механизме технологического процесса представим функцию отклика следующим полиномом [9]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<l}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l}^k b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (5)$$

где  $Y^*$  – расчетное значение параметра оптимизации;  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – выборочные коэффициенты, которые можно получить методами регрессионного анализа, используя результаты эксперимента.

Построение математической модели является необходимым элементом экспериментального исследования. Решение задачи по построению математической модели ТП нанесения ГТН-покрытий проводилось по следующим этапам: формализация задачи, конструирование плана эксперимента, проведение эксперимента, предварительный статистический анализ результатов эксперимента, построение математических моделей по результатам эксперимента, анализ качества полученной модели, проведение расчетного эксперимента с использованием построенных моделей, формирование выводов и рекомендаций. Указанные действия являются ТП получения и обработки информации при решении задач моделирования и оптимизации. Когда цель исследования состоит в одновременном получении математической модели и поиске оптимальных условий, сначала строится модель, а затем проводится поиск оптимальных условий. После проведения формализации выполняется конструирование плана эксперимента, от которого зависит объем информации, ее качество и надежность. Конструирование плана эксперимента проводили с помощью пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей (ППП ПРИАМ)» [8–10]. В пакете реализована специально разработанная адаптивная процедура определения структуры, которая является частью технологии и имеет высокую эффективность [11–12].

**Выбор и обоснование критериев оптимизации ГТН-покрытий и управляемых факторов.** Использование технологии ГТН-покрытий основано на возможности управления этим процессом с целью обеспечения максимальной прочности и ресурса деталей ДВС при их минимальной стоимости. Фазовый состав, структура, механические и эксплуатационные свойства поверхностей с покрытиями есть функции параметров процесса их нанесения.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что поверхность с покрытиями обладает требуемыми свойствами при заданных параметрах ГТН. Одна из важнейших характеристик ТП получения деталей с ГТН-покрытиями – воспроизведение и стабильность их свойств. Эта характеристика определяется количеством параметров ГТН как управляемых, так и неуправляемых, которые влияют на срок службы деталей и ресурс двигателей. Процесс ГТН характеризуется большим числом факторов, оказывающих влияние на свойства поверхностей с покрытиями, управляя которыми можно повысить срок их службы. На условия формирования ГТН-покрытий неаддитивно влияют конструктивные особенности оборудования для ГТН, параметры процесса напыления, характеристики материала покрытия [4]. Технологические параметры процесса ГТН должны обеспечивать заданные свойства поверхностей и работоспособность деталей ДВС. Для определения оптимальных режимов процесса ГТН-покрытий исследовалось влияние параметров ГТН на свойства покрытий, таких как прочность сцепления и износостойкость (табл. 1–4).

Таблица 1. – Зависимость прочности сцепления на срез и износостойкости от дистанции напыления

№ эксперимента	Дистанция напыления, L, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )	№ эксперимента	Дистанция напыления, L, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )
1	140	90	0,013	5	120	88	0,012
2	100	110	0,012	6	160	80	0,014
3	180	71	0,014	7	80	119	0,015
4	200	60	0,015	8	160	72	0,013

Таблица 2. – Зависимость прочности сцепления на срез и износостойкости от толщины покрытия

№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )
1	1,5	109	0,011	5	0,5	86	0,012
2	2,5	108	0,012	6	1,5	115	0,011
3	1	110	0,014	7	3	89	0,015
4	2	120	0,013	8	3	95	0,013

Таблица 3. – Зависимость износостойкости от нагрузки на образец

№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )
1	6	85	0,012	5	2	120	0,012
2	4	110	0,012	6	10	80	0,014
3	8	90	0,014	7	4	110	0,011
4	8	90	0,013	8	2	120	0,011

Таблица 4. – Зависимость износостойкости от скорости скольжения

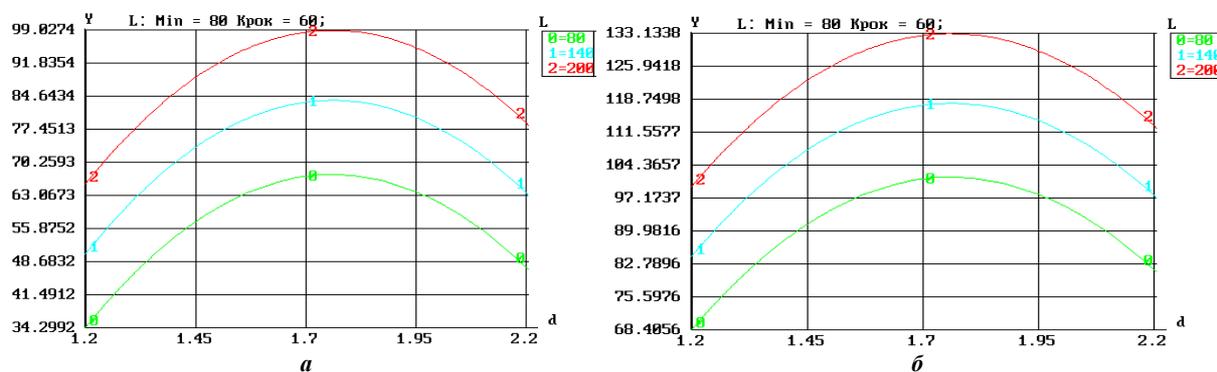
№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_n$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	Интенсивность изнашивания, $J_n$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )
1	2,3	100	0,012	5	2,45	90	0,012
2	2,6	110	0,013	6	2,75	120	0,015
3	2,15	85	0,014	7	2,3	100	0,011
4	2	80	0,014	8	2	80	0,015

**Математическое моделирование процесса газотермического напыления покрытий.** Для моделирования процесса ГТН-покрытий на основе анализа проведенного ранжирования определена группа факторов, которые в большей степени влияют на величину критериев оптимизации, установлены уровни их варьирования. В результате экспериментальных исследований процесса ГТН-покрытий выбраны следующие факторы: конструкторские (толщина покрытия); технологические (дистанция напыления); эксплуатационные (нагрузка, скорость скольжения). Параметрами оптимизации являлись: интенсивность изнашивания  $J_n$  и прочность сцепления  $\sigma_{сц}$ . По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построены регрессионные модели зависимостей критериев оптимизации, характеризующих прочность сцепления и износостойкость ГТН-покрытий, от конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов. По результатам исследований построена математическая модель (6) зависимости критерия оптимизации, который характеризует прочность сцепления покрытий, от параметров ГТН (см. табл. 1–2); расчет моделей осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ.

$$Y_{сц} = 94,5537 - 16,1578x_1 + 8,66664x_2 - 4,37462x_3 - 17,2747x_4 - 3,92423 x_1x_2 - 16,0642 x_1x_3 - 17,0532x_2x_3 - 22,4759x_1x_4 - 9,99573x_2x_4 + 1,41499x_3x_4, \quad (6)$$

где  $Y_{сц}$  – математическая модель в кодированных значениях для прочности сцепления покрытия.

Используя графический метод исследования влияния факторов на параметр оптимизации, характеризующий прочность сцепления покрытия, получены результаты, на основе которых выполнялось построение семейства графиков частных уравнений регрессии (рис. 1).



уровень  $a$ :  $h = 1,5$ ;  $L = 180$ ;  $P = 2$ ; уровень  $б$ :  $V = 2$ ;  $h = 0,5$ ;  $L = 200$ ;  $P = 2$ ;  $V = 2$

Рисунок 1. – Графики частных уравнений регрессии  $Y_{сц} = f(X_1, X_2)$ , факторы зафиксированы на разных уровнях

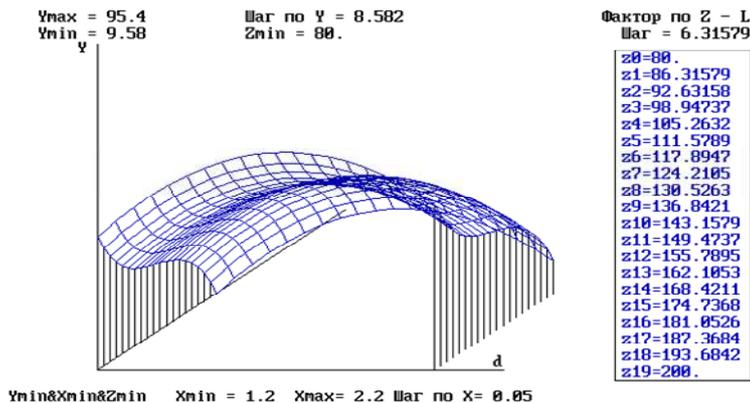
Анализ графиков позволяет рассмотреть влияние факторов на значение функции отклика и определить те их значения, которые обеспечат больший или меньший эффект. Полученные результаты дают наглядное представление о геометрическом образе функции отклика (рис. 2).

Результаты статистического анализа позволяют сделать вывод, что математическая модель (6) зависимости прочности сцепления покрытий от параметров ГТН адекватна и информативна, результаты воспроизведены. Таким образом, делаем вывод, что математическая модель (6) адекватно описывает процесс газотермического напыления покрытий и ее можно использовать для анализа и выбора оптимальных параметров этого процесса.

По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построена математическая модель (7) зависимости критерия оптимизации, характеризующей износостойкость покрытий от параметров ГТН. Расчет модели осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ. В качестве исходных данных использованы результаты исследований, проведенных при одних и тех же условиях (см. табл. 2).

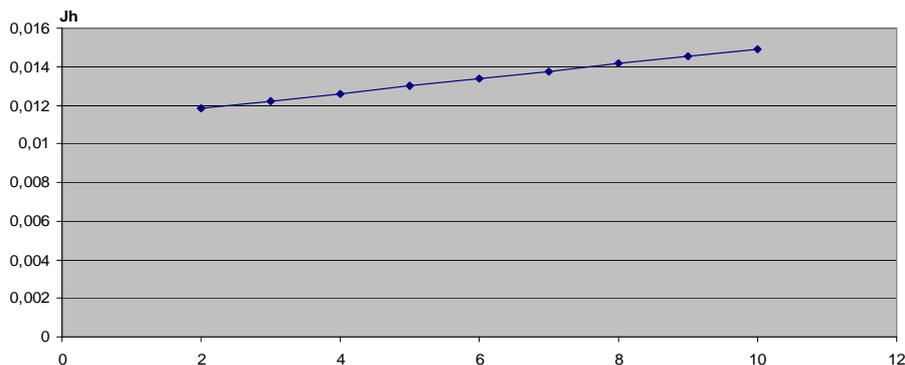
$$Y_{Jh} = 0,013375 + 0,00153333x_3, \quad (7)$$

где  $Y_{Jh}$  – математическая модель в кодированных значениях для износостойкости покрытия.



**Рисунок 2. – График исследования поверхности отклика  $Y_{сц} = f(X_1, X_2)$  в трехмерном пространстве**

Математическая модель (7) зависимости критерия оптимизации, который характеризует износостойкость покрытий от параметров ГТН (табл. 3), адекватна и информативна, результаты воспроизведены. Это говорит о том, что математическая модель (7) адекватно описывает процесс ГТН и ее можно использовать для анализа и выбора его оптимальных параметров. Уравнение регрессии (7), описывающее зависимость износостойкости  $J_h$  от параметров ГТН, представлено графически на рисунке 3.



**Рисунок 3. – График частных уравнений регрессии  $Y_{лн} = f(X_3, X_4)$**

Анализ уравнений (6) и (7) свидетельствует о том, что прочность сцепления покрытий, полученных методом ГТН, зависит от их толщины и дистанции напыления. На износостойкость покрытий влияют условия их эксплуатации (нагрузка и скорость скольжения).

Обобщая результаты исследований влияния факторов процесса ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома  $Cr_3C_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)), установлены следующие технологические параметры процесса: давление кислорода  $P_{O_2} = 0,15...0,5$  МПа, давление горючего газа  $P_{Г} = 0,03...0,05$  МПа, давление воздуха  $P_{воз.тр} = 0,1...0,2$  МПа; расход кислорода  $G_{Г} = 0,5...2,5$  м<sup>3</sup>/ч; расход горючего газа  $0,3...0,6$  м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха  $3,0...5,0$  м<sup>3</sup>/ч (воздух использовали как транспортирующий газ); соотношение кислорода к горючему газу: для ацетиленокислородной смеси  $\beta = V_{O_2} / V_{C_2H_2} = 1,1...1,4$ ; пропан-кислородной смеси  $\beta = V_{O_2} / V_{C_3H_8} = 3,5...4,0$ ; дистанция напыления  $100...200$  мм. Метод подготовки поверхности перед напылением – дробеструйная обработка. Характеристики ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома  $Cr_3C_2$  и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)) приведены в таблице 5.

**Таблица 5. – Характеристики ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30**

Характеристика покрытия	Значения
Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$ , МПа	80...120 МПа
Интенсивность изнашивания, $J_h$ , мкм/км ( $10^{-9}$ )	0,011...0,015
Микротвердость, МПа	40...43 HRC
Контактные нагрузки, МПа	До 100 МПа при наличии ударов
Толщина покрытия	0,5...10,0 мм

**Заключение.** На основе полученных экспериментальных данных разработаны модели, связывающие прочность сцепления и интенсивность изнашивания покрытий с их толщиной, дистанцией напыления и условиями эксплуатации. Решение задач математического моделирования и оптимизации процесса нанесения покрытий ГТН позволило получить комплексную оценку влияния входных (оптимизирующих) переменных на выходные показатели – свойства покрытий. Анализируя полученные модели (6), (7), следует отметить, что прочность сцепления ГТН-покрытий зависит от их толщины и дистанции напыления. На износостойкость покрытий на срез влияют условия его эксплуатации (нагрузка и скорость скольжения). Установленные режимы процесса нанесения покрытий методом ГТН позволяют наносить на функциональные поверхности деталей ДВС покрытия из композиционного порошка КХН-30 с прочностью сцепления 80...120 МПа, которая в 2...3 раза превышает аналоги (40...60 МПа), пористостью менее 10% и микротвердостью, определяемой твердостью напыляемого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полянский, А.С. Методика оптимизации количества запасных частей быстроизнашиваемых деталей двигателей / А.С. Полянский, Е.А. Дубинин // Вісник ХДТУСГ. Підвищення надійності відновлюємих деталей машин : зб. наук. праць. – Харків, 2003. – Вип. 15. – С. 50–54.
2. Вислоух, С.П. Многокритериальная оптимизация в технологических расчетах / С.П. Вислоух // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць НТУ «ХП». – Харьков, 2001. – С. 94–98.
3. Прочность материалов и элементов конструкции в экстремальных условиях / под ред. Г.С. Писаренко. – К. : Наук. думка, 1980. – Т. 2. – 767 с.
4. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск : Беспринт, 2002. – 480 с.
5. Медведева, Н.А. Повышение прочности сцепления и снижение пористости напыленных покрытий из порошковых материалов электроконтактным припеканием : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.06 / Н.А. Медведева ; Кировоград. нац. техн. ун-т. – Кировоград, 2006.
6. Ляшенко, Б.А. О критериях адгезивно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий / Б.А. Ляшенко // Проблемы прочности. – 1980. – № 10. – С. 114.
7. Радченко, С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К. : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
8. Радченко, С.Г. Методология создания новой техники и технологий / С.Г. Радченко, С.Н. Лапач // Технологические системы. – 2003. – № 1. – С. 41–44.
9. Радченко, С.Г. Математическое моделирование и оптимизация технологических систем : учеб. пособие. – К. : ИВЦ «Политехника», 2001. – 88 с.
10. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – 3-е изд. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
11. Лапач, С.Н. Пакет прикладных программ ПРИАМ / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, Н.И. Литвинчук // Информационный листок о науч.-техн. достижении. – № 88-007. – К. : УкрНИИИТИ, 1988. – 4 с.
12. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ ; под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. – К. : СП «Текпор», 1993. – С. 24–27.

Поступила 07.02.2017

#### ASSESSMENT OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF PROCESS GAS-THERMAL DUSTING OF COVERINGS ON THEIR PROPERTIES BY USING METHODS OF MATHEMATICAL PLANNING

*M. AGEEV, T. VIGERINA, K. DANKO, S. DOVZHUK, S. CHEGRAY, A. LOPATA*

*Based on experimental studies and using mathematical modeling methods, a comprehensive evaluation of the influence of the distance of the gas-thermal spraying, coating thickness and operating conditions (pressure and slip velocity) on the adhesion strength and the wear rate of coatings is presented. Multifactor experiment with a certain variation of technological (sputtering distances), design (thickness of coatings) and operational (pressure and speed of sliding) factors of the process of gas-thermal spraying made it possible to evaluate the influence of each of them on the properties of coatings. It is concluded that in order to increase the adhesion strength of gas-thermal coatings and to reduce the intensity of their wear, it is advisable to use the technological (sputtering distance), design (thickness of coatings) and operational (load and sliding speed) factors of the process of gas-thermal spraying in a comprehensive way.*

**Keywords:** *thermal spraying, thermal spray coating, adhesion strength, performance factors, wear resistance.*

УДК 621.91.02

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК; М.В. ЧЕРНЕВИЧ; Г.И. ГВОЗДЬ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены методология, модели и алгоритмы создания комплекта блочно-модульных режущих инструментов для вспомогательных и ремонтных производств. Приведены графы формирования блочно-модульных режущих инструментов различного назначения. Получены обобщенные формулы, описывающие любой тип режущего инструмента. Представленный теоретический подход по проектированию режущих инструментов на основе теории множеств проиллюстрирован технологическими схемами сборки блока резцового, фрезы торцовой и расточной головки.*

**Ключевые слова:** блочно-модульные режущие инструменты, блок резцовый, технологическая схема сборки.

**Введение.** Для расширения технологических возможностей универсальных металлорежущих станков, используемых в вспомогательных и ремонтных производствах, может быть рекомендован комплект (набор) режущих инструментов с широким спектром применения. Ключевой конструктивной составляющей комплекта является блок резцовый, который имеет унифицированные присоединительные поверхности, конструктивные элементы и размеры как для режущих пластин, так и для корпусных модулей инструментов [1]. Блок резцовый может выполнять также самостоятельную функцию режущего инструмента. Он может быть изготовлен и отремонтирован в условиях любого машиностроительного цеха, так как имеет простые по конфигурации поверхности и конструктивные элементы – цилиндрические, плоские, пазовые. На основе блока резцового формируется набор режущих инструментов, включающих токарные проходные и расточные резцы, зенкеры, фрезы, расточные и зуборезные головки [2]. Наличие такого универсального комплекта блочно-модульных режущих инструментов обеспечивает выполнение работ по механической обработке различных деталей.

Методология создания комплекта режущих инструментов основывается на принципе «от простого к сложному» [3]. Режущий инструмент представляется как цельный (простой), составной и сборный (сложный). Если цельные и составные в полной мере систематизированы, имеется определенная стандартная и нормативная база по их проектированию и изготовлению, то для сборных модульных режущих инструментов такая полная база пока не создана.

Представление до недавнего времени сборного режущего инструмента как состоящего из режущей пластины, корпуса (державки) и зажима сейчас усложняется ввиду многообразия вставок (картриджей), конструктивных модулей, механизмов зажима и переходников (адаптеров), стыкующих как сами конструктивные элементы инструмента, так и его присоединение к конструктивным элементам приспособлений и станков.

Таким образом, в связи с обширной номенклатурой применяемых режущих инструментов необходима автоматизация основных процедур их проектирования с использованием обобщенных математических моделей и алгоритмов.

**Основная часть.** Рассмотрим возможности обобщенного подхода к проектированию сборных режущих инструментов на примере блока резцового, торцовой фрезы и расточной головки. Наиболее наглядно структуру конструкций этих режущих инструментов иллюстрируют технологические схемы сборки.

Сборка блока резцового начинается со сборки прихвата  $MЗ_1$  и штифта  $MЗ_{12}$  (рис. 1). Штифт  $MЗ_{12}$  вставляется в отверстие прихвата  $MЗ_1$ . Характер соединения прихвата и штифта не дает последнему перемещаться вдоль посадочной поверхности. Полученная сборочная единица крепится к державке  $BP_1$  с помощью винта  $MЗ_{13}$ . Предварительно на штифт помещается режущая пластина  $PP$  и собранная конструкция зажимается винтом  $MЗ_{13}$ . Конструкция прихвата обеспечивает прижим пластины к основанию державки и боковой ее поверхности, гарантируя тем самым неподвижность пластины во время обработки. При необходимости под пластину режущую  $PP$  устанавливается пластина опорная  $ПО$  и в торец корпуса державки вворачивается регулировочный винт.

Технологическая схема сборки фрезы торцовой (рис. 2) построена по тому же принципу, что и блока резцового. Сборка фрезы торцовой начинается с размещения модуля зажима  $MЗ_2$  в отверстия корпуса МК фрезы БМТФ. Затем вставляются блоки резцовые  $BP$ , устанавливаются планки модуля зажима  $MЗ_3$ , которые крепятся винтами  $MЗ_{31}$ . К торцовой поверхности корпуса винтами с шайбами кре-

пится фланец МК<sub>1</sub>, в который вставляются регуляторы МР для регулирования положения блоков в корпусе. Регуляторы крепятся к фланцу винтами МК<sub>13</sub>.

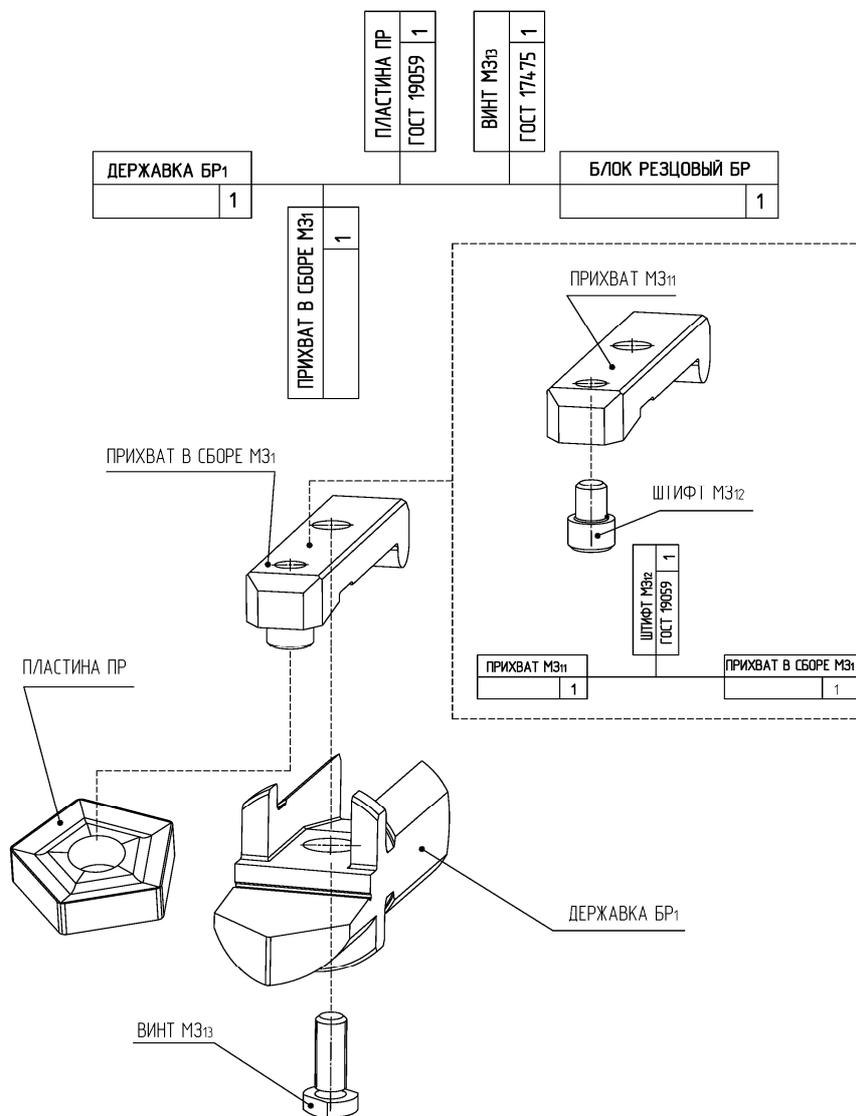


Рисунок 1. – Технологическая схема сборки блока резцового

Технологическая схема сборки расточной головки представлена на рисунке 3. Вначале собирается блок резцовый БР аналогично описанию по рисунку 1. Затем блок резцовый БР вставляется в модуль регулировочный МР<sub>1</sub> (корпус ползуна МР<sub>11</sub>), МР<sub>1</sub> вставляется в модуль корпусной МК, зажимается модулем зажимным – прихватом МЗ<sub>1</sub> (винт МЗ<sub>11</sub>, шайба МЗ<sub>12</sub>, упор МЗ<sub>13</sub>). Затем в МК вставляется винт ходовой МР<sub>12</sub>, гайка, ползуны МР<sub>13</sub> и зажимаются упором МЗ<sub>21</sub>, винтом стопорным МЗ<sub>22</sub> и шайбой МЗ<sub>23</sub>.

Разработанные технологические схемы сборки блока резцового, фрезы торцевой и головки расточной позволяют формировать базы данных по их основным конструктивным элементам для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов.

Формализация процесса проектирования комплекта блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) включает создание следующих математических моделей [3–5]:

- модель формирования исходной информации по обрабатываемым поверхностям (И) и конструктивным элементам (КЭ);
- модель обобщенной схемы обработки резанием (ОР);
- модель обобщенной конструктивной схемы БМРИ;
- модель взаимного расположения блоков и модулей БМРИ;
- модель оценки вариантов конструкций БМРИ по критериям;
- модель оценки напряженно-деформированного состояния БМРИ.

КОРПУС МК	1	БЛОК РЕЗЦОВЫЙ БР	12	ПЛАНКА МЗ3	12	ВИНТ МЗ31	ГОСТ 71475	12	ФЛАНЕЦ МК1	1	ВИНТ МК11	ГОСТ 11738	12	ВИНТ МК13	ГОСТ 11738	12	ШАЙБА МК12	ГОСТ 6402	12	ФРЕЗА БМТФ	1
		ЗАЖИМ МЗ2	12	РЕГУЛЯТОР МР	12																

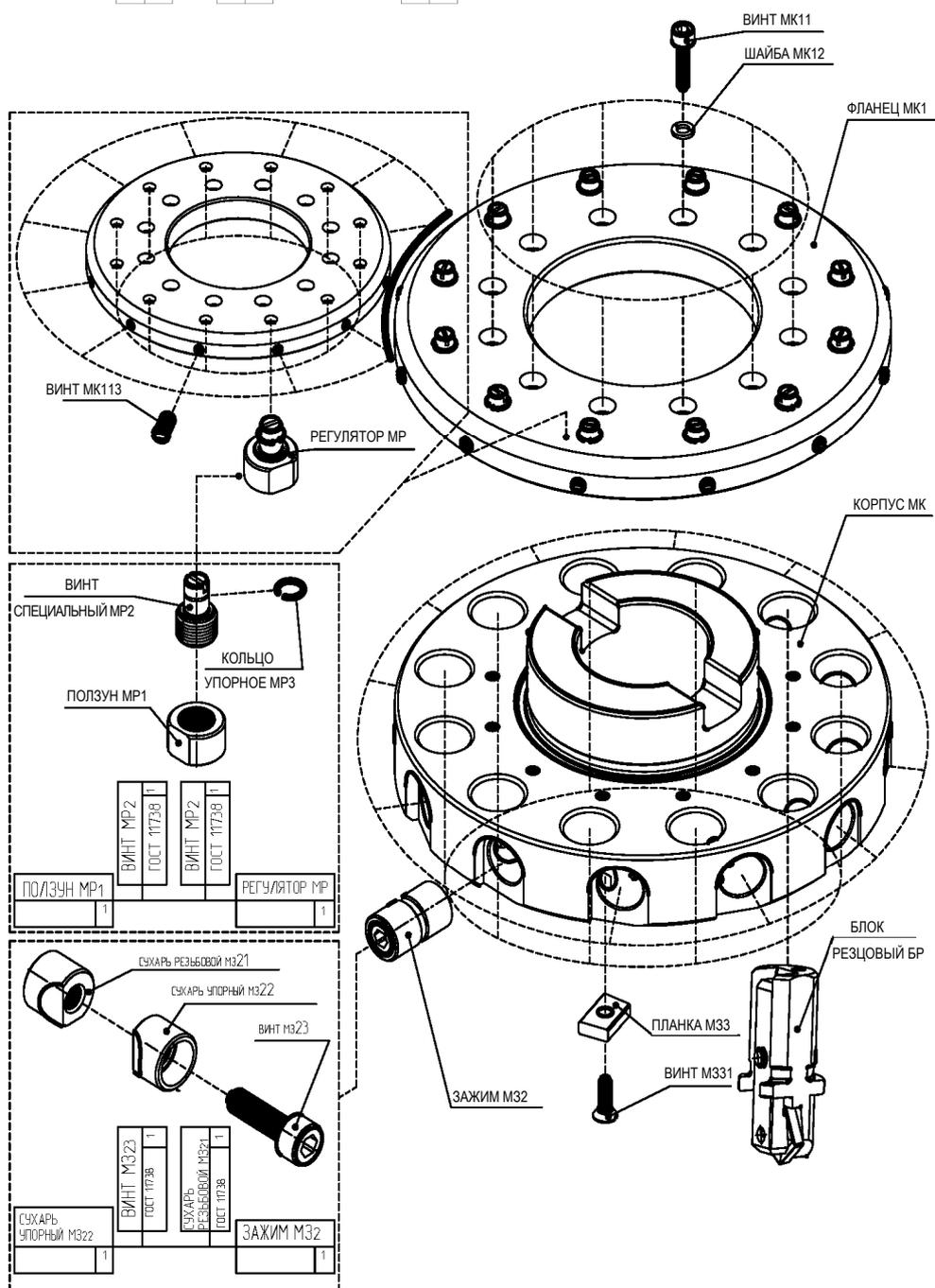


Рисунок 2. – Технологическая схема сборки фрезы торцовой

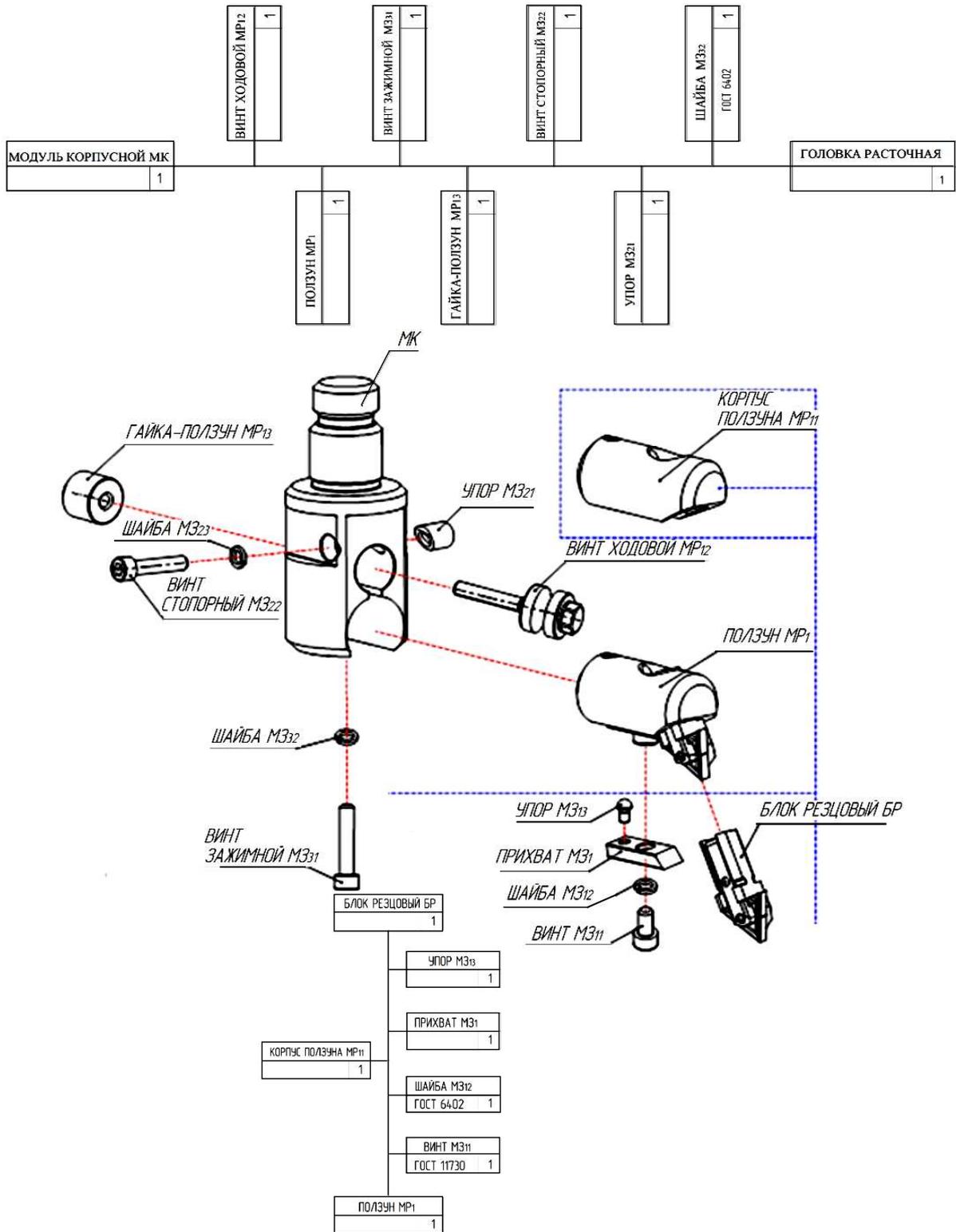


Рисунок 3. – Технологическая схема сборки головки расточной

Модель БМРИ характеризуется конструктивными, технологическими и функциональными признаками [6] и представляется в виде ориентированного графа:

$$\Gamma_1 = (X, E),$$

где  $X$  – множество вершин;  $E$  – отклонение на множестве  $X$ , которое показывает, как между собой связаны вершины.

Каждая вершина графа  $G_1$  определяет блок, модуль и конструктивный элемент или параметры блока, модуля, конструктивного элемента. Ребро  $P_1$  представляет собой подмножество вершин графа  $G_1 \subseteq X$  и одновременно  $P_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$ ,

где  $x_1, x_2$  и  $x_3$  – соответственно блок резцовый, корпусной и зажимной модули.

В свою очередь,  $x_1, x_2, x_3$  являются множествами:

$$x_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1px1}\}, \dots, x_3 = \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3px3}\}.$$

Здесь  $x_{11}$  – пластина режущая ПР;  $x_{12}$  – пластина опорная ПО;  $x_{13}$  – ломатель стружки ЛС;  $x_{14}, \dots, x_{1px1}$  – другие составляющие блока резцового БР, то есть  $P_{x1} = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{1i}$ ,  $x_{21}$  – модуль корпусной МК;  $x_{22}$  – блок рез-

цовый БР;  $x_{23}, \dots, x_{2px2}$  – другие элементы модуля корпусного, то есть  $P_{x2} = \bigcup_{i=1}^{npx2} x_{2i}$ ;  $x_{31}$  – модуль зажимной МЗ<sub>1</sub> пластины режущей ПР;  $x_{32}$  – модуль крепления пластины опорной ПО;  $x_{33}$  – модуль крепления стружколома СЛ – прихвата П;  $x_{34}$  – модуль зажимной МЗ<sub>2</sub> блока резцового;  $x_{35}$  – модуль регулировочный МР блока резцового БР;  $x_{36}$  – модуль зажимной МЗ<sub>3</sub> блочно-модульного режущего инструмента БМРИ; другие составляющие (вершины  $x_{37}, \dots, x_{3px3}$ ) т.е.  $P_{x3} = \bigcup_{i=1}^{npx3} x_{3i}$ .

Ребра  $Px_i, \dots, Pxn_{px1}, Px_{21}, \dots, Pxn_{px2}, Px_{31}, \dots, Pxn_{px}$  определяют область применения элементов режущей, корпусной и крепежной частей БМРИ. Например, ребро  $Px_{11} = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{11i}$  определяет область конструктивных элементов режущей части БМРИ:  $x_{111}$  – лезвие (ПР);  $x_{112}$  – передняя поверхность;  $x_{113}$  – задняя поверхность;  $x_{114}, \dots, x_{1px11}$  – другие конструктивные элементы.

Модуль зажимной МЗ<sub>1</sub> пластины режущей ПР включает следующий набор элементов – вершин ребра:

$$Px_{31} = \{x_{311}, x_{312}, x_{313}, \dots, x_{314}, \dots, x_{3px31}\},$$

$x_{311}$  – прихват-стружколом П-СЛ;  $x_{312}$  – штифт Ш;  $x_{313}$  – винт В1;  $x_{314} \dots x_{3px31}$  – другие элементы,

то есть  $Px_{31} = \bigcup_{i=1}^{npx31} x_{31i}$ .

Аналогичным образом описываются другие конструктивные элементы: модуль корпусной МК, модуль зажимной МЗ<sub>2</sub> блока резцового БР, модуль регулировочный МР, модуль зажимной МЗ<sub>3</sub> БМРИ на станке. Каждый конструктивный элемент характеризуется определенными параметрами и угловыми размерами. На графе это изображено ребрами:

$$Px_{11}^1, \dots, Pxn_{px1}^1, Px_{21}^1, \dots, Pxn_{px2}^1, Px_{31}^1, \dots, Pxn_{px3}^1.$$

Например, лезвие (ПР) – ребро  $Px_{111}^1$  определяется радиусом округления вершины  $\rho$  (вершины  $x_{111}^1$ ), углом наклона главной режущей кромки  $\lambda$  (вершина  $x_{112}^1$ ) и другими параметрами (вершины  $x_{113}^1, \dots, x_{1px11}^1$ ); передняя поверхность ПР (ребро  $Px_{112}^1$ ) задается передним углом  $\gamma$  (вершина  $x_{1122}^1$ ), углом фаски (вершина  $x_{1123}^1$ ), формой стружколомающих канавок (вершина  $x_{1124}^1$ ), диаметром вписанной окружности (вершина  $x_{1125}^1$ ) и другими параметрами (вершины  $x_{1126}^1, \dots, x_{1px12}^1$ ).

Таким образом, конструкция БМРИ на уровне модулей определяется совокупностью

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^3 x_i = \bigcup_{i=1} x_1 \bigcup_{i=1} x_2 \bigcup_{i=1} x_3 = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{1i} \bigcup_{i=1}^{npx2} x_{2i} \bigcup_{i=1}^{npx3} x_{3i} \tag{1}$$

и на уровне конструктивных элементов

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^{npx11} x_{11i} \bigcup_{i=1}^{npx12} x_{12i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx1} x_{px1i} \bigcup_{i=1}^{npx21} x_{21i} \bigcup_{i=1}^{npx22} x_{22i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx2} x_{px2i} \bigcup_{i=1}^{npx31} x_{31i} \bigcup_{i=1}^{npx32} x_{32i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx3} x_{px3i} \tag{2}$$

Разработанная модель является общей для любого типа БМРИ и позволяет: *во-первых*, разложить на модули, блоки и конструктивные элементы любую конструкцию сборного режущего инструмента с целью получения более полного представления об устройстве конструкции, *во-вторых*, построить логическую схему технического решения и оценить работоспособность режущих инструментов.

Модель представляется открытой и может совершенствоваться (пополняться) без изменений начальной структуры.

Общая структура математической модели расчета геометрических параметров БМРИ представляется в виде графа  $\Gamma_2 = (x_\Sigma, E_\Sigma)$ , каждой из вершин которого соответствует локальная трехмерная система координат какого-либо элемента инструмента, а дуги графа определяют матрицы перехода между этими системами координат. Определены следующие системы координат – вершины графа:

$xуz_{x11}$  – пластины режущей ПР;

$xуz_{x12}$  – пластины опорной ПО;

$xуz_{x13}$  – прихвата П стружколома ЛС;

$xуz_{x14}, \dots, xуz_{xnpk1}$  – других элементов режущей части;

$xуz_{x21}$  – модуля корпусного МК;

$xуz_{x22}$  – блока резцового БР;

$xуz_{x23}, \dots, xуz_{xnpk2}$  – других элементов модулей БМРИ;

$xуz_{x31}$  – модуля зажимного МЗ<sub>1</sub> пластины режущей ПР;

$xуz_{x32}$  – модуля крепления пластины опорной ПО;

$xуz_{x33}$  – модуля крепления прихвата П;

$xуz_{x33}$  – модуля зажимного МЗ<sub>2</sub> блока резцового БР;

$xуz_{x36}, \dots, xуz_{xnpk3}$  – модуля крепления других элементов режущей и крепежной частей.

На рисунке 4 представлен граф координат систем БМРИ.

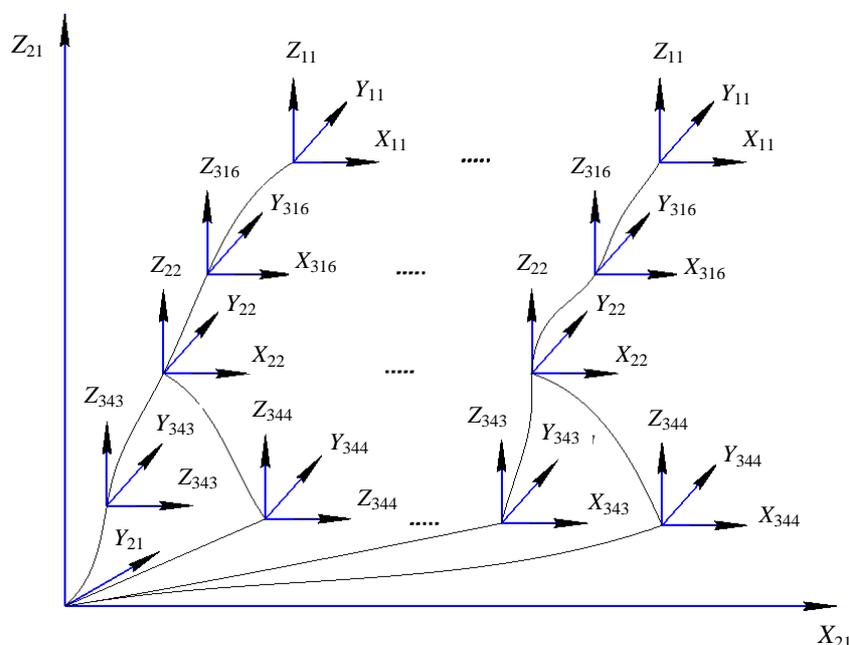
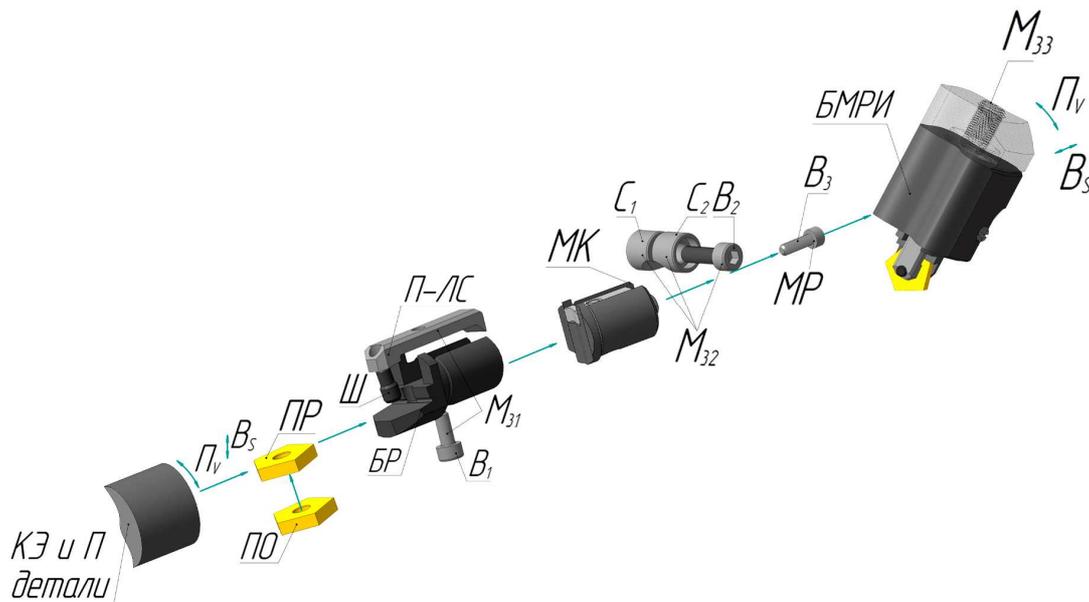


Рисунок 4. – Граф  $\Gamma_2 = (E_\Sigma)$  координатных систем элементов БМРИ

Дуги графа  $\Gamma_2 = (E_\Sigma)$  описывают связи между перечисленными системами координат с использованием матриц перехода.



**КЭ** – конструктивный элемент; **П** – поверхность;  
**П<sub>0</sub>** и **В<sub>0</sub>** – поступательное и вращательное движения детали; **ПР** – пластина режущая;  
**ПО** – пластина опорная; **БР** – блок резцовый; **Ш** – штифт; **МЗ<sub>1</sub>** – модуль зажимной **БР**;  
**П-ЛС** – прихват-ломатель стружки; **В<sub>1</sub>** – винт 1; **МК** – модуль корпусной; **МЗ<sub>2</sub>** – модуль зажимной **БР**;  
**С<sub>1</sub>** и **С<sub>2</sub>** – сухари 1 и 2; **В<sub>2</sub>** – винт 2; **МР** – модуль регулировочный; **В<sub>3</sub>** – винт 3;  
**МЗ<sub>3</sub>** модуль зажимной **БМРИ**; **БМРИ** – блочно-модульный режущий инструмент;  
**П<sub>БМРИ</sub>** и **В<sub>БМРИ</sub>** – поступательное и вращательное движения **БМРИ**

**Рисунок 5. – Формирование элементов обобщенного БМРИ**

Для обобщенной конструкции БМРИ на рисунке 5 матричное представление систем координат описано выражением, которое переводит координаты отсчета, заданные в следующей системе:

$$[M] = [M]_{x_{11}, x_{21}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{22}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{316}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{21}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{316}} \cdot [M]_{x_{22}, x_{21}} \times [M]_{x_{316}, x_{22}} \cdot [M]_{x_{22}, x_{343}} \cdot [M]_{x_{22}, x_{344}} \cdot [M]_{x_{343}, x_{344}} \cdot [M]_{x_{344}, x_{21}} \tag{3}$$

Переход одной системы координат в другую осуществляется перемножением матриц:

$$[M]_{xyz_i} - xyz_{i+1} = [Mx] \cdot [My] \cdot [Mz] \cdot [Mu] \tag{4}$$

где  $[Mx], [My], [Mz]$  – матрицы вращения координатной системы  $xyz_i$  относительно осей  $x, y, z$  системы координат  $xyz_{i-1}$ ;  $[Mu]$  – матрица перемещений начала координат системы  $xyz_{i-1}$ .

$$[Mx] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & \sin \psi_x & 0 \\ 0 & -\sin \psi_x & \cos \psi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [My] = \begin{bmatrix} \cos \psi_y & 0 & -\sin \psi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \psi_y & 0 & \cos \psi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$[Mz] = \begin{bmatrix} \cos \psi_z & \sin \psi_z & 0 & 0 \\ -\sin \psi_z & \cos \psi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [Mu] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\bigcup_x & -\bigcup_y & -\bigcup_z & 1 \end{bmatrix},$$

где  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$  – углы поворота системы координат  $xyz_{i+1}$  относительно соответствующих осей координат  $xyz_i$ ;  $\bigcup_x, \bigcup_y, \bigcup_z$  – значения смещений центра системы  $xyz_{i+1}$  относительно  $xyz_i$  в направлении осей  $x, y, z$ .

Множество таких преобразований представляет модель расчета БМРИ. Система исходной информации, необходимая для проектирования обобщенной конструкции БМРИ, однозначно заданной объединениями (1), (2), представляется в виде графа  $G_3 = (x, E)$ . Ребро  $P_2$  этого графа является областью формирования исходных данных, которые разбиты на три группы. Первая группа исходных данных (ребро  $P_{21}$ ) характеризует обрабатываемый конструктивный элемент или поверхность. Ребро  $P_{22}$  объединяет группу исходных данных, характеризующую условия эксплуатации БМРИ (функциональные признаки). Третья группа исходных данных (ребро  $P_{23}$ ) относится к процессу изготовления БМРИ (технологические признаки). Параметры БМРИ представлены на графе ребром  $P_3$  (конструктивные признаки). Поступательные  $П$  и вращательные  $В$  движения заготовки и инструмента обеспечивают выбор модели вида  $OP$ .

**Заключение.** Разработанные технологические схемы сборки блока резцового, фрезы торцовой, головки расточной обеспечивают формирование баз данных по их основным конструктивным элементам для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов.

Предложенные модели и алгоритмы позволяют определить:

- положение и ориентацию режущих, опорных стружколомающих и других элементов режущей части относительно посадочного гнезда блока резцового и модуля корпусного;
- положение и ориентацию посадочного гнезда блока резцового или модуля корпусного относительно установочной базы корпуса инструмента;
- параметры установки модуля корпусного на станке второго порядка для изготовления пазов и отверстий под  $ПР$ ,  $ПО$  или  $БР$ ;
- взаимное расположение компонентов вне зависимости от их числа и первоначальной ориентации в местных системах координат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте : пат. ВУ19260 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков ; заявка на изобретение № а 20110025 от 06.01.2011.
2. Режущий инструмент : пат. ВУ19226 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков ; заявка на изобретение № а 20110026 от 06.01.2011.
3. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск : Технопринт, 2001. – 396 с.
4. Таратынов, О.В. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ : учеб. пособие для вузов / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков, Ю.Л. Тарамыкина. – М. : Высш. шк., 1991. – 423 с.
5. Гуляев, Ю.Б. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе автоматизированного проектирования и выбора сборных торцовых фрез : автореф. дис. .... канд. техн. наук / Ю.Б. Гуляев. – М., 2006. – 24 с.
6. Попок, Н.Н. Обоснование классификации режущих инструментов по конструктивным, технологическим и функциональным признакам / Н.Н. Попок // Машиностроение : сб. : в 2-х т. – 2005. – Вып. 21. – Т. 1. – С. 143–150.

Поступила 02.02.2017

#### MODEL AND ALGORITHM FOR DESIGNING OF BLOCK-MODULAR CUTTING TOOLS

*N. POPOK, M. CHERNEVICH, G. GVOZD*

*The methodology, models and algorithms for creating a set of block-modular cutting tools for auxiliary and repair industries are considered. Graphs of the formation of block-modular cutting tools for various purposes are given. Generalized formulas describing any type of cutting tool are obtained. The presented theoretical approach on design of cutting tools on the basis of set theory is illustrated by technological schemes of the incisive block, end mill and boring head assembly.*

**Keywords:** *block-modular cutting tools, incisive block, technological schemes of the incisive.*

УДК 614.846

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ  
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ  
АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СВЯЗКЕ****А.П. РУСТАМОВ; канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО  
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск)**

На основании анализа факторов, влияющих на режущую способность сегментного алмазного круга, определены технологические и эксплуатационные параметры, управление которыми позволит увеличить режущую способность инструмента, а следовательно, повысить интенсивность проведения аварийно-спасательных работ, связанных с разборкой завалов, образовавшихся в результате обрушений зданий и сооружений. Исследованы механические характеристики связки, модифицированной ультрадисперсными алмазами. Установлено, что твердость модифицированных связок выше, а коэффициент трения ниже, чем у чистых связок. Проведены испытания режущих кругов с сегментами, изготовленными на модифицированной связке. Сетка эксперимента построена на основе равномерно распределенных последовательностей (ЛП-последовательностей). Разработана математическая модель процесса резания при выполнении аварийно-спасательных работ, которая позволит путем вычислительного эксперимента прогнозировать режущую способность алмазного инструмента, а значит сроки выполнения работ.

**Ключевые слова:** аварийно-спасательные работы, интенсивность их проведения, режущая способность инструмента, сегментный алмазный круг.

Чрезвычайные ситуации (ЧС) природного и техногенного характера приводят к разрушению зданий и сооружений, что влечет за собой необходимость выполнения работ по разборке завалов. Наибольшую сложность представляет ликвидация завалов, образованных при разрушении современных крупнопанельных зданий, так как при этом получается хаотическое нагромождение крупных железобетонных глыб, соединенных между собой металлической арматурой. Эти завалы разбирают поэлементно с помощью кранов, лебедок и тракторов при отделении частей здания бетоноломами, автогенными аппаратами или бензорезами. Под бензорезом подразумевается автономная компактная пила, которая снабжена вращающимся диском с режущей кромкой. Успешность выполнения аварийно-спасательных работ (АСР) определяется проведением мероприятий по ликвидации ЧС в короткие сроки, что обеспечивается применением эффективных способов и технологий, механизацией этих работ, привлечением современных машин и оборудования [1].

**Основная часть.** При использовании бензорезов эффективность проведения АСР зависит от скорости резания и стойкости режущего круга. Необходимо максимально интенсифицировать процесс резания. Однако имеется ряд факторов, которые не позволяют существенно повысить режимы резания. Альтернативой этой проблеме выступают другие факторы, управляя которыми, можно повысить скорость резания.

Алмазные круги с прерывистым режущим слоем (сегментные) получили наибольшее распространение и изготавливаются диаметром от 200 до 3500 мм с толщиной корпуса 1,5...15 мм. Такие круги состоят из корпуса (несущей основы инструмента), в качестве которого используется обычно закаленная инструментальная сталь; на периферии его имеются радиальные пазы и закрепляются алмазосодержащие сегменты, изготовленные преимущественно методами порошковой металлургии.

Проведен системный анализ факторов, влияющих на работоспособность алмазного инструмента. Все влияющие факторы разделены на три группы [2]:

- *конструктивные*, учитывающие форму и размеры режущего круга и сегментов;
- *технологические*, связанные с материалом сегмента и способом его изготовления;
- *эксплуатационные* – параметры привода, сообщаемого вращение режущему кругу; характеристики обрабатываемого материала; объективные условия работы и субъективный фактор – квалификация работающего с инструментом.

Диаметр и толщина диска – корпуса режущего круга непосредственно влияют на скорость и силу резания, так как линейная скорость резания на периферии диска прямо пропорциональна его радиусу, а от ширины пропила, то есть от толщины диска и сегмента, зависит сила резания как сила сопротивления обрабатываемого материала.

С точки зрения прочности инструмента важнейшими конструктивными параметрами являются толщина корпуса, форма и размеры пазов. Другие конструктивные параметры, влияющие на напряженное состояние в наиболее опасных местах отрезных кругов (высота алмазоносного слоя, определяющая при прочих равных условиях срок службы круга, ширина и длина сегментов, расстояния между ними), также во многом определяют работоспособность инструмента и экономичность его применения.

Анализ факторов, влияющих на эффективность проведения аварийно-спасательных работ, схематично представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. – Факторы, влияющие на эффективность проведения АСР

Эффективность работы режущих кругов во многом зависит от характеристики режущего алмаза – концентрации алмазов и их зернистости. Прочность алмазных зерен, оцениваемая разрушающей нагрузкой, – один из основных параметров, определяющих работоспособность инструмента.

Работоспособность алмазных инструментов в значительной степени определяется прочностью алмазных зерен и надежностью их закрепления в матрице (связке). Исследования особенностей разрушения алмазного слоя позволяют сделать вывод о том, что его структура и свойства, а также процессы, происходящие в нем при работе инструмента, в значительной степени определяют ресурс инструмента. Опыт эксплуатации серийно производимого алмазного инструмента на металлической связке свидетельствует о том, что большей частью алмазные зерна, выпавшие из связки, не выработали свой ресурс. Поэтому управление процессами, протекающими в зоне контакта алмазов и связки при изготовлении инструмента, с целью получить заданные структуру и свойства адгезионной зоны может служить основой повышения надежности закрепления зерен и, соответственно, работоспособности инструмента в целом.

В процессе резания алмазное зерно подвергается воздействию статических и динамических сил, циклическому нагреву и охлаждению, которые влияют на его прочность. Прочность режущего сегмента зависит от свойств связки, удерживающей зерна, так как она является своеобразным демпфером, воспринимающим усилие: при низкой твердости связки зерна углубляются, не производя резания, а при высокой твердости происходит интенсивное разрушение зерна. Если связка изнашивается быстрее алмаза, он будет выпадать, если медленнее – эффективность обработки снижается вследствие полировки связки. Таким образом, учитывая рассмотренные виды изнашивания и разрушения алмаза, можно сделать вывод о том, что для повышения производительности алмазных отрезных кругов необходимо создать оптимальную связку, которая увеличит срок службы инструмента и уменьшит его стоимость [3].

Алмазные частицы в металлической связке можно закрепить методом литья алмазосодержащих сплавов; зачеканиванием и шаржированием зерен в металлический корпус, изготовленный из пластичных материалов; методами порошковой металлургии и электрохимического осаждения. Причем более

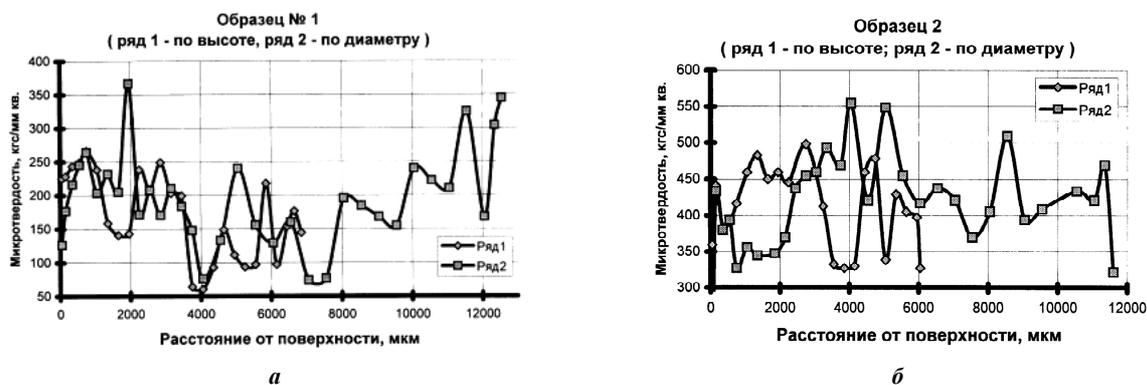
распространен инструмент, изготовленный методами порошковой металлургии. Суть метода порошковой металлургии заключается в том, что смесь металлических порошков с другими компонентами подвергают уплотнению и последующей термической обработке (спеканию) при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. В результате процессов диффузии, расплавления легкоплавких компонентов с образованием растворов спрессованное тело после термической обработки приобретает высокую прочность, электропроводность и другие физико-механические свойства, приближающиеся к свойствам, аналогичным по составу материалов, полученных литьем. Использование в качестве исходных материалов порошков позволяет формировать в пресс-форме заготовки точные по форме и размерам, что сводит к минимуму объем механической обработки.

Таким образом, эффективность применения алмазных отрезных кругов зависит от многих факторов: конструктивных особенностей инструмента, режимов резания, характеристики алмазосодержащего слоя, условий эксплуатации. При выборе рациональных параметров алмазного режущего инструмента следует исходить из комплексной оценки каждого из них, так как все они взаимосвязаны и обеспечивают необходимый эффект только в результате правильно выбранного сочетания.

Металлические связки представляют собой многокомпонентные порошковые смеси, основными составляющими которых являются Co, Cu, W, Al, легированные соединениями Ti, V и другими элементами. Разработка новых металлических связок с улучшенными эксплуатационными свойствами является актуальной проблемой. Практически ставится задача создания нового класса инструментальных материалов. Большие возможности в этом плане открывает технология получения металлических связок, модифицированных ультрадисперсными алмазами (УДА). Введение таких материалов в металлические связки изменяет процесс компактирования и спекания последних, их физико-механические и эксплуатационные свойства [4].

Методом электроконтактного спекания изготовлены экспериментальные образцы режущих элементов отрезного алмазного инструмента на модифицированных металлических связках и предназначены для исследования их физико-механических и триботехнических свойств. Половина образцов каждой связки имеют форму цилиндра с размерами:  $\varnothing 12$  мм,  $h - 10$  мм; другая половина имеет форму прямого параллелепипеда с размерами  $7 \times 8 \times 24$  мм.

Проведено исследование триботехнических свойств металлических связок. Микротвердость измерялась на микротвердомере «Micromet-II» фирмы «Buehler» (Швейцария) с нагрузкой 100 г. Графики изменения микротвердости приведены на рисунках (для образца связки № 1 – 2, а; для образца связки № 2 – 2, б), причем измерение микротвердости осуществлялось как по диаметру образца, так и по его высоте.



а – на основе меди; б – на основе кобальта

Рисунок 2. – Микротвердость образца

Проведены также триботехнические испытания металлических связок, модифицированных УДА. Рассмотрим механизм взаимодействия алмазного зерна и модифицированной связки с обрабатываемым материалом. Процесс изнашивания модифицированного алмазосодержащего слоя состоит из нескольких взаимосвязанных и одновременно протекающих фаз: абразивного износа и механического удаления (вырывания) зерен, а также абразивного истирания связки. Вырывание зерен из связки происходит в результате воздействия на них тангенциальных составляющих силы резания, а абразивное истирание связки – вследствие воздействия на нее мелкодисперсных продуктов разрушения обрабатываемого материала.

Если связка имеет износостойкость ниже оптимальной, алмазные зерна из нее преждевременно выпадают, в итоге используются нерационально. Если износостойкость связки выше оптимальной, на вершинах режущих алмазных зерен образуются площадки износа, следовательно, для внедрения

алмазных зерен в обрабатываемый материал требуются дополнительные силы, которые приводят к возникновению больших усилий резания и разрушению алмазоносного слоя.

Триботехнические свойства металлических связок изучались при помощи специальной установки УТИМ-2. Триботехническим испытаниям были подвергнуты металлические связки, модифицированные ультрадисперсным алмазным порошком соответствующей концентрации. В процессе испытаний производились измерения коэффициента трения, температуры фрикционного разогрева и суммарного износа образцов. Получены определенные закономерности износа связок в зависимости от степени легирования их порошком ультрадисперсного алмаза. Наиболее наглядно кинетику износа отражает изменение коэффициента трения на определенном пути и за определенное время (2 ч) при одинаковой нагрузке, равной 10 Н.

Так, для связки М2-01 наиболее оптимальной является 0,5% концентрация УДА, при которой коэффициент трения изменяется в пределах 0,2...0,25 за 4 часа. В то время как коэффициент трения «чистой связки» находился на уровне 1,3 в течение 2-х часов.

Микрорентгеноспектральные исследования экспериментальных образцов режущих элементов показали высокую гомогенность спеков, повышение их микротвердости. Равномерное распределение модифицирующих наноалмазных частиц позволяет выровнять удельное электросопротивление спекаемого слоя, что приводит к получению гомогенной структуры спека по всему объему. Установлено, что оптимальной концентрацией легирования металлических связок порошком УДА является диапазон 0,5...0,75%. Повышение твердости модифицированных связок снижает интенсивность их изнашивания и повышает прочность алмазоудержания, о чем свидетельствует снижение удельного расхода алмазного сырья на 10%. Однако увеличение концентрации УДА до 1% и выше приводит к резкому повышению коэффициента трения и температуры в зоне обработки, увеличивает твердость связки, снижает ее пластичность, затрудняет процесс вскрытия новых режущих зерен, вызывая тем самым ухудшение эксплуатационных свойств алмазного инструмента. Следует отметить, что повышение значений механических характеристик связок режущих сегментов позволяет только прогнозировать улучшение эксплуатационных качеств круга в целом при работе без охлаждения (как это часто происходит при АСР) и с увеличенными скоростями резания и подачи.

Таким образом, требуется провести испытания экспериментальных образцов сегментов на модифицированной связке в реальных условиях эксплуатации. Результаты этих испытаний могут быть использованы для построения математической модели процесса резания.

Для проведения испытаний изготовлены отрезные сегментные круги диаметром 300 и толщиной 4 мм, на каждый из которых припаяны режущие сегменты на медной связке с различной зернистостью алмаза и концентрацией УДА в связке. В качестве привода режущего круга использовали бензорез отечественного производства, стоящий на вооружении подразделений МЧС. Бензорез был установлен стационарно и перемещался поступательно вместе с вращающимся кругом при помощи специального приводного устройства для обеспечения регламентированной подачи. Вскрытие алмазных зерен производилось при работе бензорезом вручную, после чего измеряли размер сегментов перед началом испытаний. Скорость продольной подачи и глубину резания контролировали при помощи линейки и секундомера. Износ сегментов круга, равный уменьшению высоты их алмазоносного слоя, измеряли индикатором часового типа. Испытание круга проводили до тех пор, пока его износ не достигал  $\frac{1}{4}$  высоты алмазоносного слоя. Износ сегментов круга рассчитывали как среднее арифметическое результатов четырех измерений изменения высоты сегментов, равноудаленных друг от друга на периферии круга.

В качестве критерия работоспособности принята режущая способность, характеризуемая удельной производительностью резания. Удельную производительность определяли по формуле

$$П = \frac{L \cdot h}{t},$$

где  $L$  – общая длина реза, см;  $h$  – среднее значение глубины реза, см;  $t$  – время резания, мин.

Основной проблемой, возникающей при проведении экспериментальных исследований [5], является построение оптимальных измерительных сетей – пространственного расположения точек измерения. При планировании оптимальных измерительных сетей обычно исходят из некоторого обобщенного критерия, учитывающего множество таких факторов, как стоимость измерений, точность описания различных составляющих поля и т.д. Разработанные различными авторами процедуры поиска рациональной сети обычно исходят либо из прямоугольной, либо из ромбической сетки расположения точек съема информации. Представляется эффективным такое расположение этих точек, чтобы их координаты формировались по алгоритмам планируемого ЛП-поиска (ПЛП-поиска), достаточно просто реализуемым на ЭВМ [6]. Эффективность данного подхода объясняется, с одной стороны, упорядоченным целенаправленным характером проведения экспериментов во всей области измерений благодаря одновременной реализации в нем идеи дискретного квазиравномерного по вероятности зондирования многомерного пространства

варьируемых параметров и методологии планируемого математического эксперимента, с другой – тем, что использование планирования экспериментов обеспечивает широкое применение различных эвристических процедур исследования и анализа.

Сочетание таких идей в алгоритме ППП-поиска позволяет, во-первых, осуществить глобальный квазиравномерный просмотр заданной области варьируемых параметров, во-вторых, применить многие формальные оценки из математической статистики. Существенное уменьшение числа экспериментов при сохранении доверия к их результатам состоит в специальной организации исследования и разработке алгоритмов обработки информации, учитывающих конечный объем выборок.

Направленный ЛП-поиск позволяет выполнить полнофакторный эксперимент по точкам, равномерно распределенным в объеме гиперпараллелепипеда, не оставляя пустых, неизученных пространств, как это бывает при рандомизации пространства методом Монте-Карло. ЛП-поиск предполагает организацию области исследований в виде многомерного куба или параллелепипеда, гранями которого являются диапазоны изменений параметров. При этом происходит формализация этих диапазонов, и размерность параметра не имеет значения. Каждая точка такого многомерного пространства определяется сочетанием параметров и представляет собой одно из состояний исследуемой системы, характеризуемое определенными значениями параметров и критериев.

Назначены три изменяемых параметра: один технологический – концентрация модификатора в связке; два эксплуатационных – скорость резания и подача.

Область исследований представлена многомерным пространством параметров (табл. 1), исследуемые точки и результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 1. – Пространство параметров

Управляемые параметры процесса резания (наименование и размерность)	Границы возможных изменений параметров	
	нижняя граница	верхняя граница
Концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,5	1,5
Окружная скорость круга, м/с	20,0	40,0
Подача, см/мин	20,0	30,0

Таблица 2. – Экспериментальные значения (сетка эксперимента) и результаты измерений

Номер эксперимента	Концентрация УДА (параметр $P_1$ )	Окружная скорость (параметр $P_2$ )	Подача (параметр $P_3$ )	Удельная производительность резания
1	1,0	30	250	490
2	1,25	25	275	430
3	0,75	35	225	580
4	1,125	37,5	287,5	460
5	0,625	27,5	237,5	600
6	0,875	32,5	212,5	560
7	1,375	22,5	262,5	540
8	1,5	40	231,25	410

По результатам эксперимента построена математическая модель в виде уравнения регрессии, которая связывает между собой режимные эксплуатационные параметры и критерий «удельная производительность», характеризующий режущую способность инструмента:

$$K = 344,662P_1 + 0,0961P_2 - 46,393P_3 - 2,172P_1^2 + 0,00619P_2^2 + 15,863P_3^2,$$

где  $P_1$  – параметр «концентрация УДА»;  $P_2$  – параметр «окружная скорость»;  $P_3$  – параметр «подача».

**Заключение.** Установлено, что модифицирование ультрадисперсным алмазом позволяет изменять механические характеристики связки режущих сегментов; твердость связки повышается, а коэффициент трения снижается, что подтверждено экспериментально. Металлографические исследования модифицированной связки показали повышение плотности и снижение пористости по сравнению с «чистой» связкой.

Проведены испытания режущих кругов с сегментами, изготовленными на модифицированной связке с различной концентрацией ультрадисперсного алмаза при различных эксплуатационных режимах; сетка эксперимента для трех изменяемых параметров построена на основании равномерно распределенных ЛП-последовательностей; в качестве критерия выбрана удельная производительность алмазного круга.

По результатам эксперимента построена *математическая модель, связывающая между собой технологические* (концентрация ультрадисперсного алмаза в связке) и *эксплуатационные* (скорость резания, подача) *параметры с интенсивностью* (удельная производительность) *резания*.

Определена *оптимальная концентрация модификатора в связке* (0,5...0,75%).

В дальнейшем вычислительный эксперимент с использованием математической модели (решение обратной задачи) позволит установить *рациональные режимы резания при заданной удельной производительности и стойкости круга*.

По результатам проведенных исследований можно сделать *вывод*, что повышение удельной производительности резания способствует проведению аварийно-спасательных работ в более сжатые сроки, а повышение стойкости инструмента позволит реже производить его замену, что также сократит сроки выполнения АСР и снизит их стоимостные показатели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голов, Г.И. Демонтажные работы при реконструкции зданий / Г.И. Голов. – М. : Стройиздат, 1990. – 143 с.
2. Рустамов, А.П. Факторы, влияющие на работоспособность режущего инструмента при проведении аварийно-спасательных работ / А.П. Рустамов, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. тр. XII междунар. науч.-техн. конф., 2015. – Курск. – С. 164–170.
3. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М. : Машиностроение, 1967. – 113 с.
4. Основы проектирования и технологического изготовления абразивного алмазного инструмента / В.Н. Бакуль [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975.
5. Статников, И.Н. Планирование вычислительного эксперимента в задачах многокритериального моделирования динамических систем / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Компьютерное моделирование. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – С. 104–112.
6. Статников, И.Н. Построение аппроксимационных моделей при проведении имитационных экспериментов / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Автоматизация научных исследований в области машиноведения. – М. : Наука, 1983. – С. 19–24.

Поступила 16.01.2017

#### THE EXPERIMENTAL MODEL OF THE CUTTING PROCESS IN THE CONDUCT OF RESCUE WORK IN THE DIAMOND CIRCLES ON A MODIFIED BUNDLE

*A. RUSTAMOV, O. SMILOVENKO*

*Based on the analysis of the factors influencing cutting capacity of a segment diamond wheel technological and operational parameters are determined, control of which will allow to increase cutting capacity of the tool and consequently to increase intensity of carrying out the wrecking connected to disassembling of the blockages formed as a result of building collapses and constructions. Mechanical characteristics of the sheaf modified by ultradispersible diamonds are probed. It is set that hardness of the modified sheaves is higher, and the friction coefficient is lower, than at clean ligaments. Tests of the cutting circles with the segments made on the modified sheaf are carried out. The grid of an experiment is constructed on the basis of uniformly the distributed sequences (LP-sequence). The mathematical model of process of cutting in case of execution of a wrecking which will allow to predict cutting capacity of a diamond tool and consequently periods of performance of work by a computing experiment is developed.*

**Keywords:** *rescue work, the intensity of the event, the cutting ability of the tool, segment diamond wheel.*

УДК 621.923

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК*  
(Полоцкий государственный университет);  
*Д.Г. ЛАТУШКИН; Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ; Н.В. ПУТЕЕВ*  
(Витебский государственный технологический университет)

*Исследуется влияние технологических факторов на шероховатость поверхности зубчатых колес после шлифования. Сформулированы задачи исследования. Приведены результаты экспериментов. Выполнено математическое моделирование изучаемого процесса. Приведена формула для прогнозирования изменения шероховатости зубчатых колес в зависимости от параметров скорости шлифовального круга, а также вертикальной и радиальной подачи круга.*

**Ключевые слова:** зубчатые колеса, шероховатость, зубошлифование, рациональные режимы, точность, моделирование процесса.

Метод зубошлифования – один из распространенных методов финишной обработки зубьев цилиндрических колес, обеспечивающий 3...6-ю степень точности их поверхностей по ГОСТ 1643 [1]. Назначение рациональных режимов при зубошлифовании предусматривает наибольшую производительность при высоком качестве боковых поверхностей зубьев колес. В рекомендуемых режимах шлифования, как правило, указывается диапазон значений параметров [2].

Для назначения оптимальных режимов приходится проводить обработку опытной партии заготовок, что влечет дополнительные временные и денежные траты. Математическая модель влияния технологических факторов на шероховатость боковой поверхности зубьев позволит более рационально назначать режимы шлифования колес.

### Методика проведения экспериментов

Исследования выполнялись в производственных условиях ОАО «Вистан» (Витебск).

Объектами исследования являлись зубчатые колеса 16ВТ20.20.205 со следующими параметрами:

- модуль  $m = 2,25$  мм;
- число зубьев  $z = 21$ ;
- степень точности 6-В;
- твердость зубьев после термообработки 46...54 HRC;
- шероховатость зубьев  $Ra 0,32$  мкм;
- материал сталь 40Х ГОСТ 4543.

Обработка деталей производилась на станке модели 5В833 червячным шлифовальным кругом. В ходе экспериментов использовались червячные шлифовальные круги из электрокорунда белого 24А зернистостью 12...25, твердостью СМ1. Перед проведением каждого опыта выполнялась правка круга стальным накатником.

Для исследования были выбраны следующие факторы:

- скорость круга –  $V_k$ , м/с;
- радиальная подача –  $t$ , мм/ход;
- вертикальная подача –  $S_v$ , мм/об дет.;

Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения уровней и интервалов варьирования факторов, выбранных для эксперимента

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Скорость круга – $x_1$ , м/с	30	35	40	5
Радиальная подача – $x_2$ , мм/ход	0,04	0,05	0,06	0,01
Вертикальная подача – $x_3$ мм/об дет.	1	1,5	2	0,5

С целью выяснить, как влияют технологические факторы на шероховатость боковой поверхности зубьев колес, проведен эксперимент, в котором:

- число факторов  $k = 3$ ;
- число уровней  $p = 2$ ;
- число опытов  $N = 8$ ;
- число повторных опытов  $n = 5$ .

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования								Рабочая матрица			Результаты эксперимента, $y_{it}$ , мкм	Среднее значение $\bar{y}_i$ , мкм
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$ $x_2$	$x_1$ $x_3$	$x_2$ $x_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	скорость круга, м/с	радиальная подача, мм/ход	вертикальная подача, мм/об дет.		
1	+	+	+	-	+	-	-	-	40	0,06	1	0,17 0,22 0,30 0,27 0,32	0,25
2	+	-	+	-	-	+	-	+	30	0,06	1	0,25 0,29 0,20 0,23 0,18	0,23
3	+	+	-	-	-	-	+	+	40	0,04	1	0,30 0,26 0,16 0,31 0,25	0,25
4	+	-	-	-	+	+	+	-	30	0,04	1	0,22 0,21 0,38 0,32 0,19	0,26
5	+	+	+	+	+	+	+	+	40	0,06	2	0,28 0,23 0,25 0,15 0,34	0,25
6	+	-	+	+	-	-	+	-	30	0,06	2	0,31 0,19 0,20 0,20 0,30	0,24
7	+	+	-	+	-	+	-	-	40	0,04	2	0,25 0,28 0,18 0,36 0,22	0,26
8	+	-	-	+	+	-	-	+	30	0,04	2	0,28 0,14 0,33 0,30 0,25	0,26

#### Анализ результатов эксперимента

После проведения эксперимента выполнена статистическая обработка результатов. Определены ошибки повторных (параллельных) опытов. Среднеквадратичное отклонение находим по выражению [3]:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}. \quad (1)$$

Данные расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3. – Среднеквадратичные отклонения опытов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$S_i^2$	0,0217	0,0224	0,0214	0,0226	0,0222	0,0231	0,0213	0,0228
$S_i$	0,147	0,149	0,146	0,150	0,149	0,152	0,146	0,151

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по следующей формуле:

$$s_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{N \cdot (n-1)} = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N}. \quad (2)$$

Из расчета получаем  $s_{\{y\}}^2 = 0,0221$ .

Проверку однородности дисперсий можно выполнять по критериям Фишера и Кохрена.

Проверка по критерию Фишера:

$$F_{расч.} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} = \frac{S_6^2}{S_7^2}. \quad (3)$$

Получаем  $F_{расч.} = 1,08$ .

Табличное значение критерия Фишера  $F_{табл.} = 6,4$  [3].

Так как табличное значение больше расчетного, то дисперсии считаются однородными.

Проверка по критерию Кохрена:

$$G_{расч.} = \frac{S_{max}^2}{\sum_1^N S_i^2}. \quad (4)$$

Получаем  $G_{расч.} = 0,130$ .

Табличное значение критерия Кохрена  $G_{табл.} = 0,396$  [3].

Таким образом, выполнено условие  $G < G_{табл.}$ :  $0,130 < 0,396$ , значит, дисперсии однородны.

Уравнение математической модели с учетом парных взаимодействий имеет вид

$$y' = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (5)$$

Коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте определяют по выражениям:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N y'_u}{N}. \quad (6)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot y'_u}{N}. \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y'_u}{N}, \quad i \neq j. \quad (8)$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot x_{ku} \cdot y'_u}{N}, \quad i \neq j \neq k. \quad (9)$$

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,25; & b_1 &= 0,158; \\ b_2 &= 0,088; & b_3 &= 0,0504; \\ b_{12} &= 0,1526; & b_{13} &= -0,0348; \\ b_{23} &= 0,114; & b_{123} &= 0,0384. \end{aligned}$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости  $s_{\{y\}}^2 = 0,0221$  и доверительной вероятности  $a = 0,95$  рассчитываются границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot s_{\{y\}}^2}{\sqrt{N}} = \pm 0,146. \quad (10)$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, видим, что коэффициенты  $b_3$ ,  $b_{13}$  и  $b_{23}$  незначимы. Но, так как  $b_3$  – линейный коэффициент, величина которого близка к  $\Delta b_i$ , решено его не исключать.

Уравнение математической модели имеет вид

$$y' = 0,25 + 0,158 \cdot x_1 + 0,088 \cdot x_2 + 0,0504 \cdot x_3 + 0,152 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,114 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (11)$$

Проверяем адекватность полученного уравнения.

Вычисляем теоретические значения параметра оптимизации  $y'$ , величину ошибки  $\Delta y$ .

Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Теоретические значения параметра оптимизации

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y'$	0,2448	0,2244	0,2449	0,2552	0,2447	0,2348	0,2550	0,2553
$\Delta y$	0,0052	0,0056	0,0051	0,0048	0,0053	0,0052	0,0050	0,0047
$\Delta y^2$	0,000027	0,000031	0,000026	0,000023	0,000028	0,000027	0,000025	0,000022

Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$S_{a0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y} - y')^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y^2}{f}, \quad (12)$$

где  $f$  – число степеней свободы,  $f = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$ ,

тогда

$$S_{a0}^2 = \frac{0,1902}{4} = 0,04755.$$

Адекватность математической модели определяется по критерию Фишера:

$$F_{расч} = \frac{S_{a0}^2}{s_{\{y\}}^2} = \frac{0,04755}{0,02221} = 2,1515. \quad (13)$$

Так как табличное значение больше расчетного ( $2,1515 < 6,4$ ), то модель является адекватной. Окончательно модель имеет следующий вид:

$$Ra = 0,25 + 0,158 \cdot V_{\kappa} + 0,088 \cdot t + 0,0504 \cdot S_g + 0,152 \cdot V_{\kappa} \cdot t + 0,114 \cdot V_{\kappa} \cdot S_g. \quad (14)$$

Полученное соотношение показывает взаимосвязь шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности с такими факторами, как скорость круга, радиальная подача и вертикальная подача.

На параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. Наибольшее влияние оказывают скорость круга и парное взаимодействие скорости круга и радиальной подачи. В наименьшей степени влияет вертикальная подача.

#### **Заключение**

По результатам экспериментальных исследований предложена математическая модель зависимости шероховатости боковой поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес от технологических факторов, таких как:

- *скорость* шлифовального круга;
- *вертикальная подача*;
- *радиальная подача*.

Модель позволяет прогнозировать качество обработанной поверхности зубьев колес при заданных параметрах режима шлифования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски : ГОСТ 1643-81 ; Введ. 21.04.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 42 с.
2. Сильвестров, Б.Н. Справочник молодого зуборезчика : учеб. пособие / Б.Н. Сильвестров. – М. : Высш. шк., 1981. – 199 с.
3. Основы теории проектирования технических систем : учеб. пособие для студентов вузов / Е.И. Махаринский [и др.] ; УО «ВГТУ». – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2009. – 354 с.

*Поступила 02.02.2017*

#### **MODELING OF THE TECHNOLOGICAL FACTORS INFLUENCE ON THE PRECISION OF GEARS IN THE TOOTH REGRINDING**

***N. POPOK, D. LATUSHKIN, Y. MAHAKINSKY, N. PUTEEV***

*The influence of technological factors on the roughness of the surface of the gear wheels after grinding is investigated. The research tasks are formulated. The results of experiments are presented. The mathematical modeling of the process under study was performed. A formula for predicting changes in the roughness of gears, depending on the parameters of the grinding wheel speed, as well as the vertical and radial feed rates of the wheel is given.*

***Keywords:*** *gears, roughness, tooth regrinding, rational modes, accuracy, modeling process.*

УДК 621.436.44

## ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ

Д. Ф. БАЛТИКОВ

(Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия)

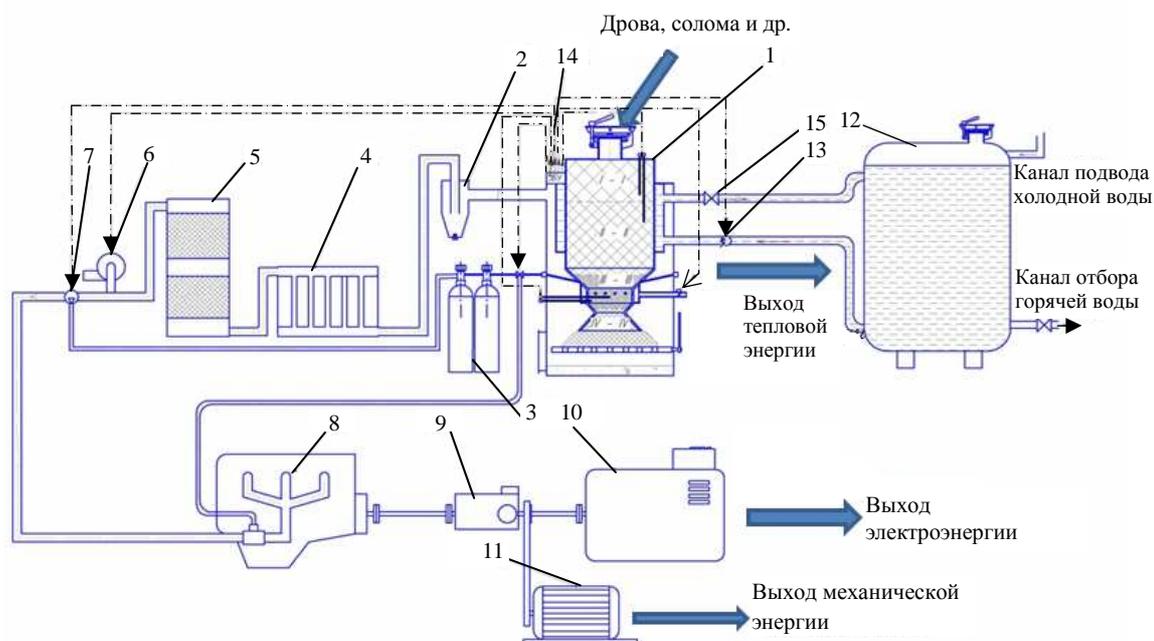
Рассматривается применение энергетической установки в летней молочно-товарной ферме, удаленной от линии электропередач. Представлены основные показатели работы энергетической установки, по которым можно определить время, необходимое для получения тепловой энергии, носителем которой служит вода, нагретая до нужной температуры. По составу генераторного газа определена мощность двигателя. Для получения максимального эффекта рекомендовано использовать в качестве первоначального топлива смесь твердых и мягких пород древесины в равных долях.

**Ключевые слова:** газогенераторная установка, энергетический комплекс, альтернативное топливо, древесные отходы, генераторный газ.

Специфика и местные различия в схемах электроснабжения зависят от размеров территории страны, ее климатических условий, уровня экономического развития, объема промышленного производства, плотности размещения электрифицированных объектов и их энергоемкости. Основные источники питания электроэнергией – электростанции и питающие сети районных энергетических систем.

У предприятий, в частности **фермерских хозяйств**, базирующихся в горно-лесистой зоне, возникают трудности с проведением сети электроэнергии. Снабжение электричеством в данном случае имеет свои специфические особенности – возникает необходимость в получении различных альтернативных видов энергии [1–5]. Одним из вариантов решения этого вопроса является применение на ферме в качестве энергетического комплекса газогенераторной установки с использованием отходов различных пород древесины. Для этого требуется определить экономические и мощностные показатели установки, среди которых коэффициент полезного действия нагревателя газогенераторной установки; мощностные показатели двигателя внутреннего сгорания; состав генераторного газа, что и явилось целью данной работы.

**Энергетический комплекс с газогенераторной установкой** – наиболее рациональный вариант источника различных видов энергии для предприятий, базирующихся в горно-лесистой зоне. Республика Башкортостан обладает существенным природно-ресурсным потенциалом для реализации этого направления, кроме того на ее территории располагается значительное количество перерабатывающих предприятий. В связи с этим был разработан энергетический комплекс с газогенераторной установкой (рис. 1), вырабатывающий энергию путем переработки (сжиганием) отходов древесины.

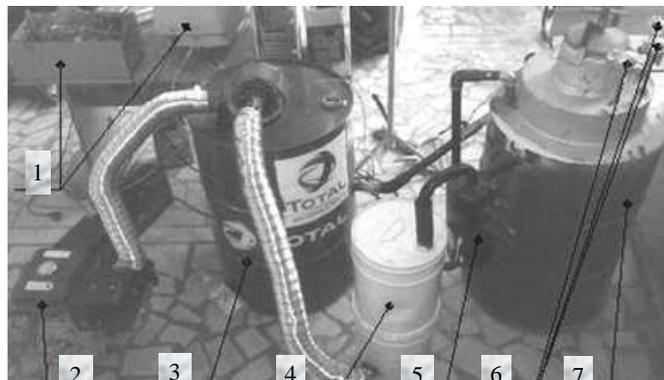


1 – котел; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – газовый баллон; 4 – система охлаждения; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – вентилятор; 7 – компрессор; 8 – двигатель внутреннего сгорания; 9 – редуктор; 10 – электрогенератор; 11 – привод доильной установки; 12 – емкость горячей воды; 13 – водяной насос; 14 – электронный блок управления

Рисунок 1. – Схема энергетического комплекса с газогенераторной установкой

Сжигание древесного топлива происходит в котле газогенераторной установки энергетического комплекса. В результате получаем генераторный газ для последующего его применения в двигателе внутреннего сгорания, предназначенном для выработки механической энергии.

На базе Башкирского государственного аграрного университета создан первый прототип энергетической установки (рис. 2) с возможностью применения в летних молочно-товарных фермах до 200 голов.



1 – электронный блок управления; 2 – бензиновый электрогенератор;  
3 – емкость, имитирующая потребителя тепловой энергии; 4 – фильтр тонкой очистки;  
5 – фильтр грубой очистки; 6 – термоматчики; 7 – газогенераторная установка

Рисунок 2. – Экспериментальный энергетический комплекс с газогенераторной установкой

Результативное функционирование энергетической установки обеспечивает правильно подобранный режим ее работы, который позволяет при минимальных затратах получить максимальный эффект. Для достижения поставленной цели нами проведены исследования по получению энергии путем сжигания разных пород древесины. В качестве топлива в газогенераторной установке использовалось местное сырье – древесные отходы.

В ходе эксперимента из трех килограммов древесных отходов дуба, березы, клена, сосны получена тепловая, механическая энергия и генераторный газ. Результаты исследования представлены на рисунке 3.

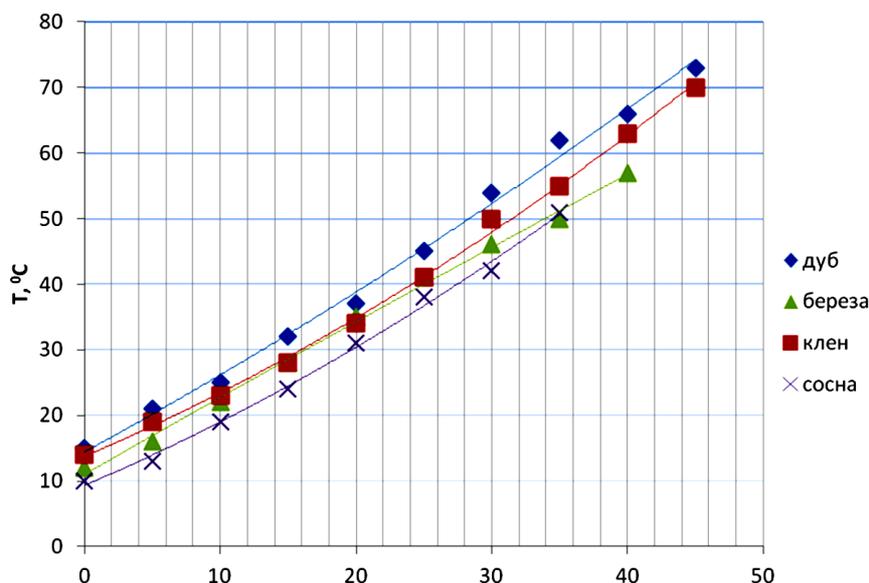


Рисунок 3. – Тепловая энергия, выделяемая разными видами древесины

По данным графикам можем рассчитать количество тепловой энергии, выделяемое разными видами древесины, определить наиболее выгодный из них, а также найти процент затрачиваемой энергии на нагрев воды, служащей носителем тепловой энергии, что и определяет КПД установки. Сравнительные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты анализа тепловой энергии энергетической установки

Вид древесины	Объемная теплотворность, $Q_{\text{пр}}$ , кДж/дм <sup>3</sup>	Энергия, затраченная на нагрев воды, $Q_{\text{вод}}$ , кДж	Коэффициент полезного действия
Сосна	8332	13440	0,53
Дуб	11128	21420	0,64
Клен	11128	20580	0,61
Береза	10320	15960	0,51

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что наиболее эффективны при использовании в энергетической установке отходы древесины наиболее твердых пород – дуба и клена.

Следующая немаловажная стадия эксперимента – получение генераторного газа для двигателя внутреннего сгорания. Качество газа напрямую влияет на КПД двигателя. При сжигании отходов тех же видов древесины газоанализатором были определены составы полученных генераторных газов, характеристики которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Состав генераторного газа различных пород древесин

Вид топлива	CO, %	CH, ppm	CO <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %
Береза	16...18	720...780	9...11	4...6
Сосна	22...24	810...840	10...12	8...9
Дуб	17...19	790...830	9...11	5...7
Клен	18...20	740...790	8...10	4...6

Состав газа из отходов сосны проиллюстрирован графиком, представленным на рисунке 4.

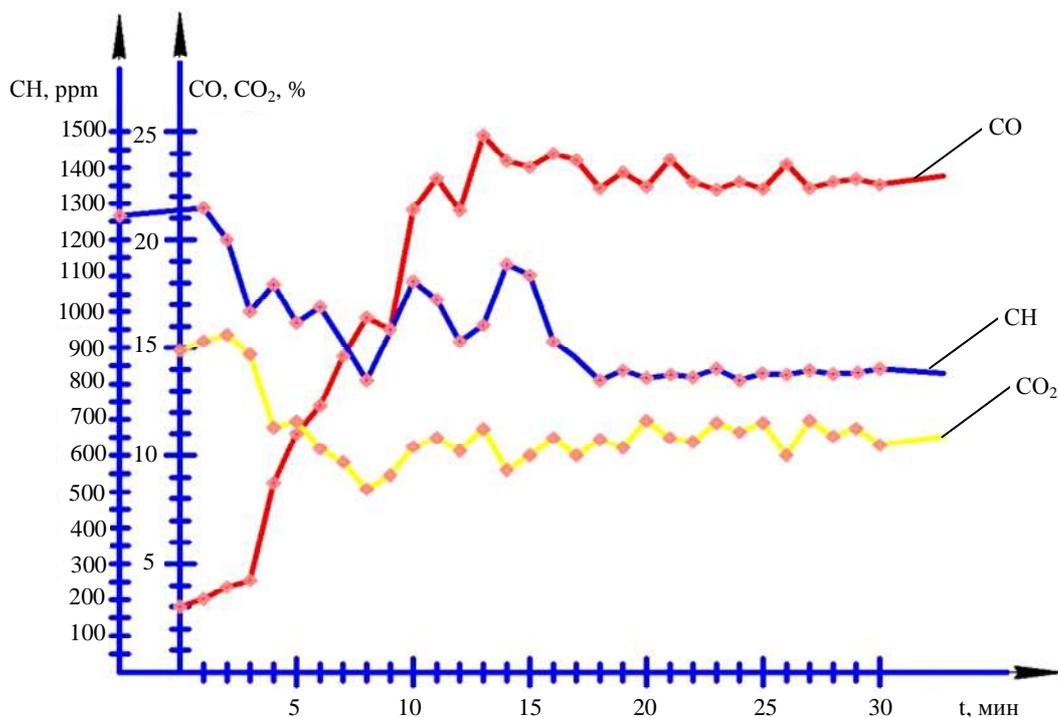
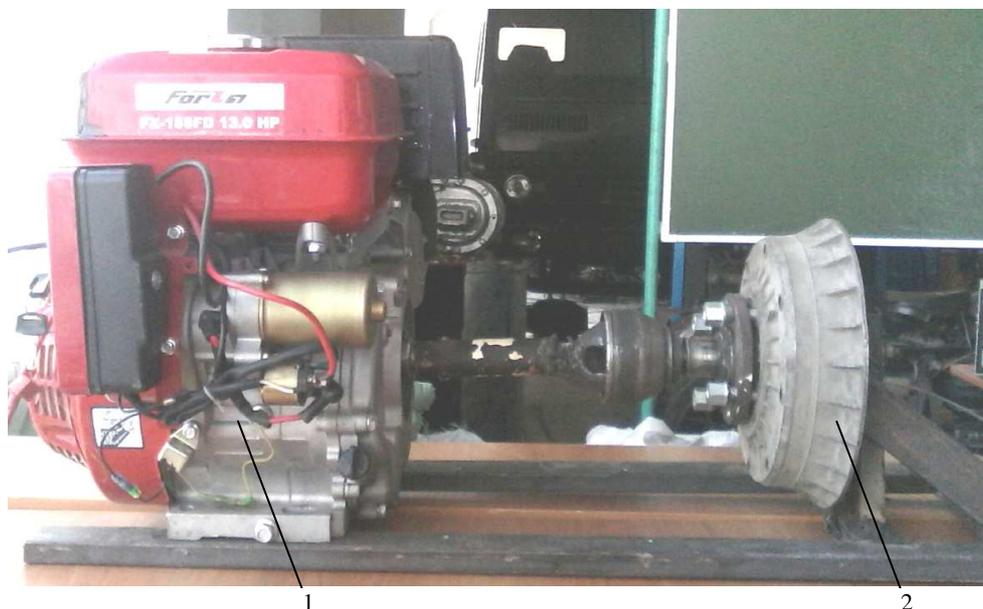


Рисунок 4. – Состав генераторного газа, полученного из отходов сосны

Результаты эксперимента показали, что наиболее качественный газ получен из отходов древесины мягких пород, но объем полученного газа меньший в сравнении с твердыми породами. Рекомендуется смешивать мягкие породы с твердыми породами древесины.

В энергетической установке двигатель играет роль источника механической энергии как для электрогенератора, так и для доильной установки летней молочно-товарной фермы. Для правильного подбора двигателя необходимо провести эксперименты по определению мощности ДВС, работающего на генераторном газе. Этот этап экспериментов состоит в использовании генераторного газа в двигателе внутреннего сгорания и измерении мощностных показателей на тормозном стенде. Для опытного двигателя была создана тормозная установка (рис. 5).



1 – двигатель; 2 – тормозной механизм

Рисунок 5. – Замер мощности двигателя внутреннего сгорания

При помощи тормозной установки двигатель нагружаем до его полного отключения. В первую очередь, для сравнения с двигателем, работающим на различных генераторных газах, измерили характеристики двигателя на бензиновом топливе. Снятые характеристики представлены на графиках (рис. 6).

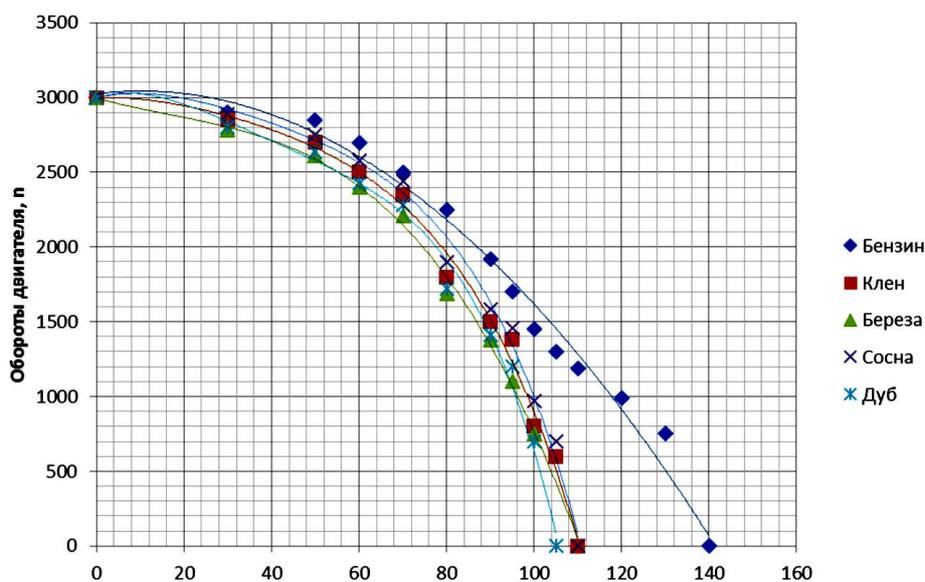


Рисунок 6. – Обороты двигателя при использовании различных видов топлив

Приведенные на рисунке 6 графики сравнительной эффективности различных технологий производства электрической энергии наглядно демонстрируют, что двигатель на бензиновом топливе отключается при 140 Н, с генераторным газом – при 100...110 Н.

Зная обороты двигателя при различных нагрузках, можно определить мощность двигателя, работающего на различных генераторных газах. Характеристики двигателя при работе на различных видах топлива представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Характеристики двигателя в зависимости от вида топлива

Вид топлива	Обороты ДВС, об/мин	Крутящий момент, Н·м	Мощность ДВС, кВт
Бензин	600	482,3	7,7
Генераторный газ:			
березы	900	352,5	3,7
осины	700	389,6	5,3
клена	600	389,6	6,2
дуба	700	371,0	5,1

Рассчитав потребляемую двигателем мощность, необходимую для нужд молочно-товарных ферм, с учетом ее потерь при работе на генераторном газе, выбираем электрогенератор и типоразмер двигателя с определенной мощностью, который подходит под мощность и количество потребляемой энергии фермерским хозяйством.

Таким образом, в летней молочно-товарной ферме мощность электродвигателя силового агрегата составляет 5,5 кВт; при его замене на двигатель внутреннего сгорания необходимо учесть коэффициент запаса мощности и выбрать двигатель с мощностью не менее 17,5 кВт.

В заключение исследования сделаны следующие **выводы**:

- по имеющимся показателям можно определить время, необходимое для получения тепловой энергии, носителем которой служит вода, нагретая до нужной температуры;
- по составу газа определена мощность двигателя, при этом потери для стационарного двигателя невелики и составляют 28...30%;
- рекомендуется в качестве первоначального топлива использовать смесь твердых и мягких пород древесины в равном соотношении (в равных долях) для получения максимального эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балтиков, Д.Ф. Газогенераторная установка малой мощности для энергообеспечения производственных процессов малых молочно-товарных ферм / Д.Ф. Балтиков, У.К. Галимов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 91–94.
2. Габитов, И.И. Газогенераторная установка для энергообеспечения летних животноводческих лагерей / И.И. Габитов, Д.Ф. Балтиков, М.Ф. Ганиев // Аграрная наука в инновационном развитии АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Башкир. гос. аграр. ун-та, в рамках XXV Междунар. специализированной выставки «Агрокомплекс-2015» ; редкол.: М.М. Хайбуллин, Э.Р. Хасанов. – Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2015. – С. 243–246.
3. Балтиков, Д.Ф. Модернизация котла газогенераторной установки обращенного процесса / Д.Ф. Балтиков, Д.И. Рафиков // Информационные технологии, системы и приборы в АПК : материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. «Агроинфо-2015» ; Башкир. гос. аграр. ун-т. – Уфа, 2015. – С. 239–242.
4. Костарев, К.В. Определение состава генераторного газа при использовании крупнокусовой древесины в газогенераторной установке малой мощности / К.В. Костарев, М.Ф. Ганиев, Д.Ф. Балтиков // Аграрная наука в инновационном развитии АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Башкир. гос. аграр. ун-та, в рамках XXV Междунар. специализированной выставки «Агрокомплекс-2015» ; редкол.: М.М. Хайбуллин, Э.Р. Хасанов. – Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2015. – С. 247–249.
5. Разработка системы машин для реализации инновационных технологий в растениеводстве Республики Башкортостан / И.И. Габитов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 5. – С. 57–62.
6. Лачуга, Ю.Ф. О вопросах технической оснащенности аграрного производства в Российской Федерации и Республике Башкортостан в современных условиях / Ю.Ф. Лачуга, И.И. Габитов // Вестн. Башкир. гос. аграр. ун-та. – 2013. – № 3(27). – С. 96–100.

7. Габитов, И.И. Регулирование выработки генераторного газа в газогенераторных установках малой мощности / И.И. Габитов, У.К. Галимов // Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники : материалы междунар. науч.-практ. конф. «Совершенствование конструкции, эксплуатации технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники», Уфа, 19–20 дек. 2013 года. – Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2013. – С. 82–86.
8. Габитов, И.И. Газогенераторная установка для технологических процессов в сельскохозяйственном производстве / И.И. Габитов, В.А. Ильин, У.К. Галимов // Изв. Междунар. акад. аграр. образования. – 2013. – Т. 4, № 16. – 199 с.
9. Балтиков, Д.Ф. Газогенераторная установка с модернизированным котлом для энергообеспечения автономных малых производств / Д.Ф. Балтиков, С.И. Габитов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 123. – С. 35–39.
10. Балтиков, Д.Ф. О влиянии вида древесного топлива на состав генераторного газа / Д.Ф. Балтиков, О.К. Садритдинов // Наука молодых – инновационному развитию АПК : материалы междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Уфа, 15–17 марта 2016 г. – Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2016. – С. 153–157.
11. Костарев, К.В. Исследование возможности применения генераторного газа в малой энергетике / К.В. Костарев, О.К. Садритдинов, Д.Ф. Балтиков // Наука молодых – инновационному развитию АПК : материалы междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Уфа, 15–17 марта 2016 г. – Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2016. – С. 231–235.

Поступила 27.01.2017

#### INDICATORS OF ENERGY COMPLEX WORK WITH GAS-GENERATOR INSTALLATION

*D. BALTIKOV*

*The application of the power plant in the summer dairy farm remoted from the power line is considered. The main performance indicators of the power plant are presented, along which it is possible to determine how long it takes to obtain heat energy as heated water to the desired temperature. The engine power is determined by the composition of the generator gas. To obtain the maximum effect, it is recommended to use a mixture of hard and soft wood in equal proportions as the initial fuel.*

**Keywords:** *gas-generating installation, energy, alternative fuels, wood waste, generating gas.*

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 656

### СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КРУПНЕЙШИХ ГОРОДОВ

канд. техн. наук, доц. **Д.В. КАПСКИЙ**; **Д.В. НАВОЙ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен анализ характеристик транспортной системы Минска с учетом модернизации автоматизированной системы управления дорожным движением города. Показана необходимость создания целостной интеллектуальной транспортной системы страны. На основе полученных результатов разработаны технологические требования к функционированию целостной системы, которые касаются уровня эффективности и уровня аварийности на участках улично-дорожной сети, входящие в создаваемую систему.

**Ключевые слова:** организация дорожного движения, безопасность, автоматизированная система управления дорожным движением, интеллектуальная транспортная система, эффективность, координированное регулирование.

За последние 20 лет число автомобилей в Республике Беларусь увеличилось в 4 раза, превысило 3 млн единиц и продолжает расти, постепенно приближаясь к среднеевропейскому уровню, порядка 500 автомобилей на 1000 жителей [1]. На рисунке 1 представлены сценарии развития уровней автомобилизации для города Минска. Сценарии привязаны к транспортным системам Стокгольма, Варшавы, Торонто и Москвы.

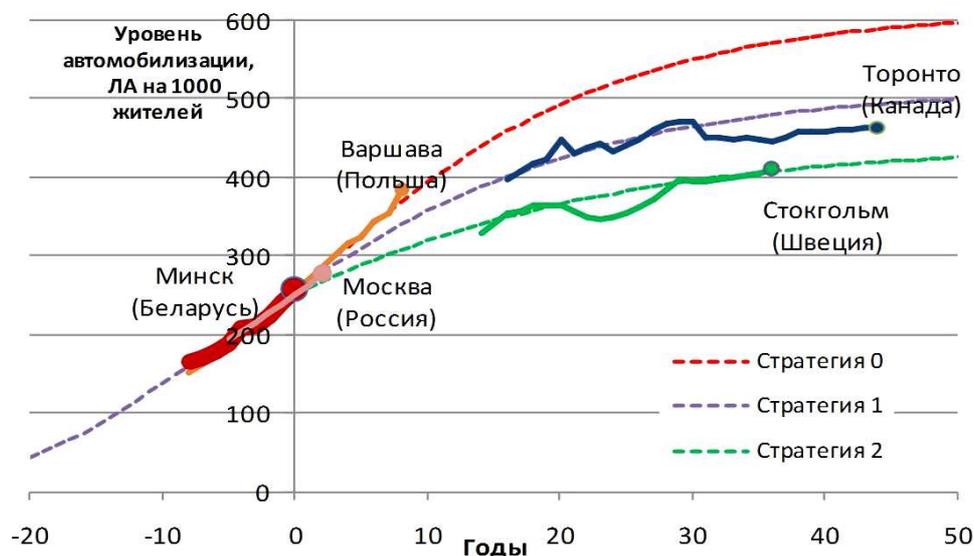


Рисунок 1. – Изменение уровня автомобилизации в некоторых странах [1–5]

Рост автомобилизации вызвал ряд проблем, связанных с увеличением нагрузки на улично-дорожную сеть (УДС), особенно в городах: снизилась скорость сообщения, ухудшились режимы движения, появились перегрузки, увеличилось выбросы вредных веществ в атмосферу и уровень транспортного шума, возросло количество аварий. Иными словами, ухудшилось качество дорожного движения, поэтому его повышение является актуальной задачей и определяется совокупностью основных свойств, таких как безопасность, экономичность, экологичность и социологичность, что может оцениваться величиной потерь, под которыми понимается социально-экономическая стоимость необязательных издержек процесса движения. Эти потери достигли масштабов порядка 6 млрд долл./год и представляют существенную угрозу для безопасности страны [6].

**Транспортная система города Минска.** Рассмотрим краткую характеристику транспортной системы города Минска. Уровень качества транспортных систем для разных городов мира представлен на рисунке 2. Качество определено уровнем энтропии той или иной транспортной системы. Сравнительный уровень аварийности различных городов за 2014 год, а именно количество погибших на 100 тысяч жителей, представлен на рисунке 3 [3–5; 7; 8].

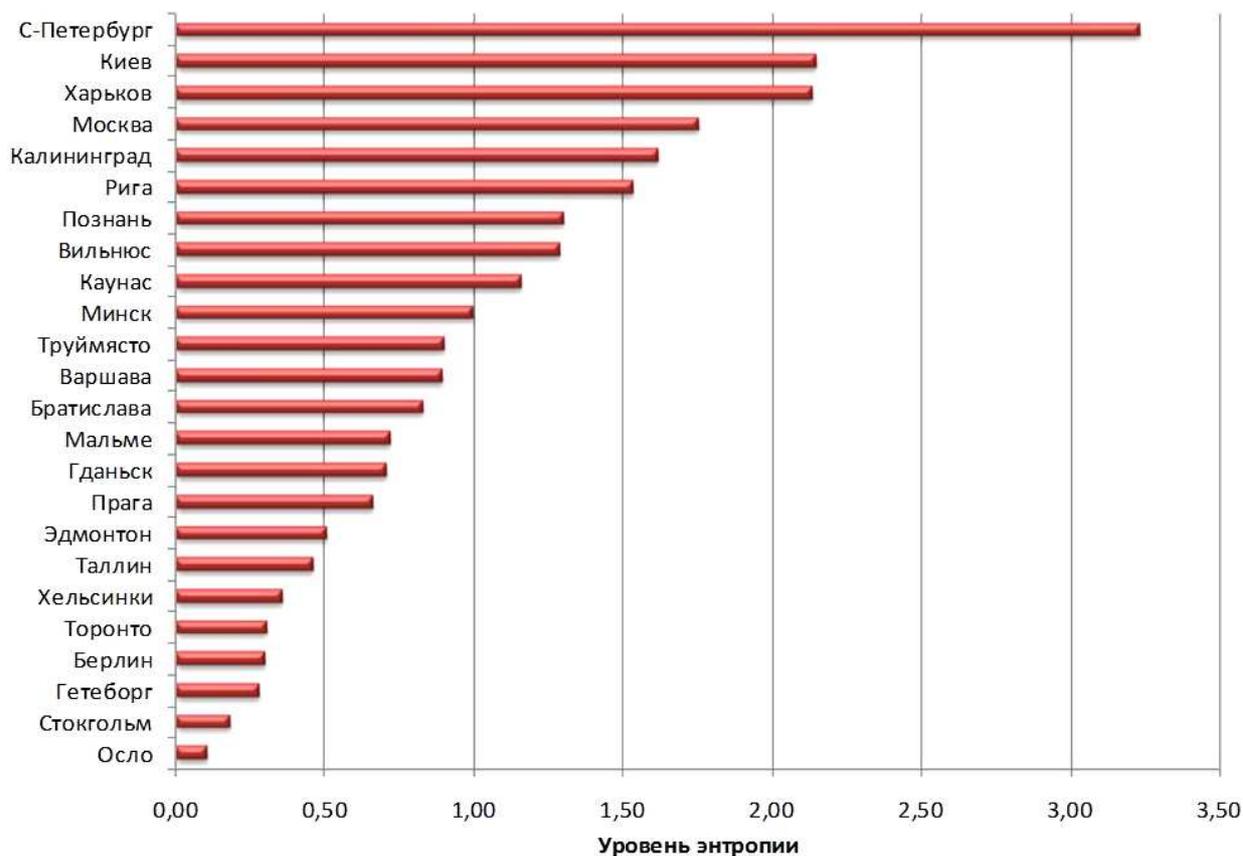


Рисунок 2. – Уровень качества транспортных систем

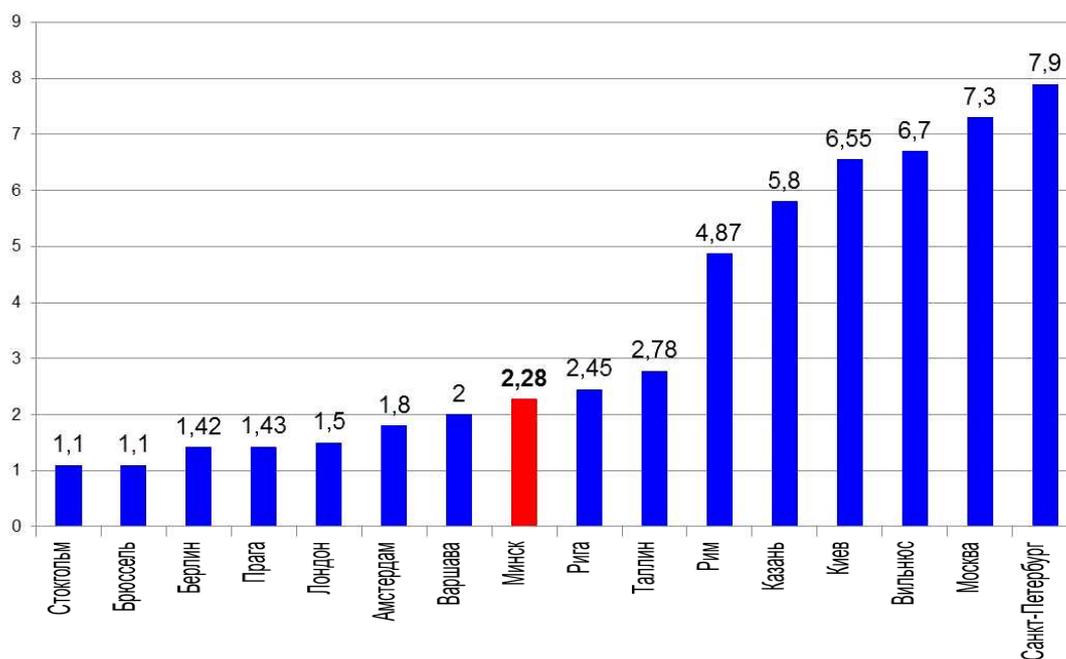


Рисунок 3. – Распределение количества погибших в ДТП на 100 тыс. жителей в 2014 году

Дорожное движение содержит аварийную, экологическую, экономическую и социальную угрозы. Для участников движения из всех угроз наиболее важной является аварийность, поскольку непосредственно касается жизни, здоровья и благополучия граждан, поэтому борьба с аварийностью имеет большую социальную значимость, и ее необходимо рассматривать на государственном уровне. Ежегодно в мире погибает более 1 млн человек и около 50 млн получают травмы. В Республике Беларусь за последние 5 лет произошло около 534,5 тыс. аварий, в которых погибли 5645 человек, получили ранения более 30,9 тыс.; с точки зрения экономической угрозы аварийные потери составили около 1,7 млрд долл. [1; 7; 9; 10].

### Общие характеристики транспортной системы города Минска

Стоимость активов транспорта (транспортная система и инфраструктура)	~ 4–5 млрд долл.
Количество автомобилей	~ 750 тыс. единиц
Общий пробег транспорта	~ 3,5 млрд км в год
Общие транспортные издержки	~ 500 млн долл. в год
Потери от регулирования	~ 100 млн долл. в год
Общий расход топлива	~ 300 тыс. тонн в год
Потери времени	~ 25 млн часов в год
Вред от выбросов вредных веществ	~ 200 млн долл. в год
Вред от аварийности	~ 100 млн долл. в год

Рассмотрим структуру интеллектуальной транспортной системы (ИТС) города Минска.

Интеллектуальная транспортная система города Минска на функциональном уровне в настоящее время представлена следующими подсистемами [11; 12]:

- автоматизированная система управления дорожным движением;
- автоматизированная система диспетчерского управления общественным транспортом;
- система видеонаблюдения в местах массового скопления граждан;
- система фотофиксации скоростных режимов;
- система контроля инцидентов и маршрутного ориентирования;
- система управления движением грузового транспорта;
- система управления парковочным пространством.

Интеграция подсистем в составе ИТС имеет различный уровень. Так, на рисунке 4 показана глубина интеграции подсистем в составе интеллектуальной транспортной системы.



Рисунок 4. – Существующие структурные связи в ИТС города Минска

Характеристика автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) города Минска заключается в следующем: АСУДД предназначена для управления движением транспортных и пешеходных потоков в городе Минске.

Автоматизированная система управления дорожным движением состоит из таких составляющих:

- программно-технический комплекс центрального управляющего пункта (ПТК ЦУП);
- каналообразующая аппаратура;
- периферийные средства для светофорных объектов:
  - дорожные контроллеры;
  - детекторы транспорта;
  - указатели скорости и другие управляемые знаки;
  - табло информирования
  - табло вызывные пешеходные;
  - светофоры.

В соответствии с Концепцией управления дорожным движением города Минска каждой улице в городе присвоен соответствующий статус, который определяет набор требований к той или иной улице. Постоянный мониторинг дорожной ситуации позволяет определить выход тех или иных параметров за пределы установленных в соответствии со статусом. В случае если система не имеет предустановленных сценариев, технологу необходимо подготовить такие сценарии (планы координации, изменение графика светофорных объектов, изменение схемы организации дорожного движения и др.); если требуются капитальные затраты, необходимо выйти с предложением на муниципальный уровень для решения той или иной транспортной задачи.

На рисунке 5 показан пример мониторинга соответствия заданных показателей реальным с помощью gps-трека. Так, при проезде той или иной улицы программа рассчитывает ряд показателей (в частности, скорость сообщения и другие) и выдает параметры, не соответствующие заданным, для дальнейшего проектирования.

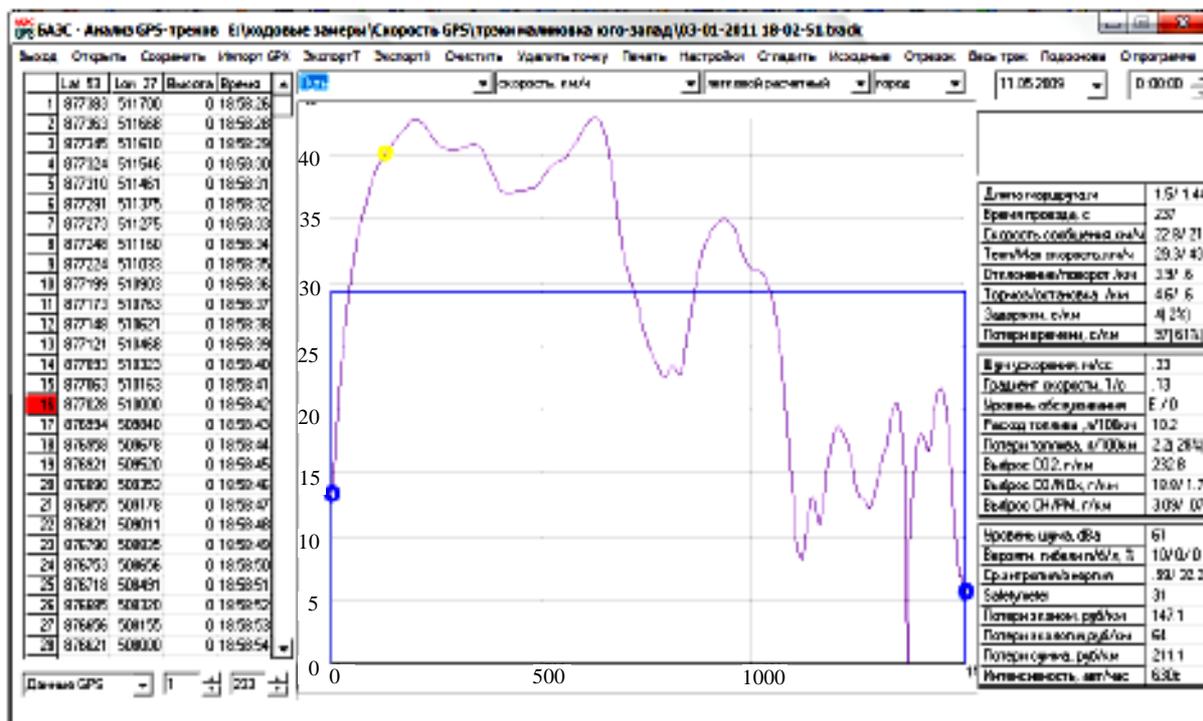


Рисунок 5. – Пример gps-трека для мониторинга дорожной ситуации

В системе реализованы программные модули, позволяющие получать сведения из базы данных системы о параметрах транспортных потоков и соответствии системы заданным технологическим параметрам. Система автоматизированного проектирования позволяет также вносить управляющие воздействия в систему на локальном и магистральном уровнях. Пример работы программного модуля на локальном уровне представлен на рисунке 6.

Направления	Q	Q <sub>м</sub>	T <sub>усл.</sub>	$\lambda$	X	No	Lo	d	D	ко	K <sub>о</sub>	Потери
Транспорт	а/ч	а/ч	с			а	м	с/а	тыс. ч ход	ост/а	млн ост/то	тыс. USD
Лево АВ												
Прямо АС	1423	5491	48	0.57	0.45	14	34	12.5	20.8	0.52	3.12	<b>117.6</b>
Право АД	158	588	48	0.56	0.48	2	27	13.8	2.5	0.54	0.36	10.6
Лево ВС												
Прямо ВD												
Право ВА												
Лево CD	260	580	51	0.62	<b>0.72</b>	3	16	22.1	6.7	0.69	0.75	24.8
Прямо СА	1423	4220	51	0.61	0.55	13	41	11.6	19.3	0.53	3.16	<b>108.2</b>
Право СВ												
Лево DA	158	1285	21	0.27	0.45	3	16	26.8	4.9	0.75	0.49	19.9
Прямо DB												
Право DC	106	1340	21	0.27	<b>0.29</b>	2	11	25.5	3.2	0.71	0.32	11.3
<b>Всего</b>	<b>3450</b>		<b>84</b>	<b>0.58</b>	<b>0.52</b>			<b>14.27</b>	<b>57.4</b>	<b>0.57</b>	<b>8.20</b>	<b>292.6</b>
Пешеходы												
Ап	220		23	0.274		3.75		30.5	7.8			3.0
Вп												
Сп	550		23	0.274		9.32		30.5	19.6			7.4
Дп	220		55	0.655		1.77		14.5	3.7			1.4
<b>Всего</b>	<b>990</b>		<b>84</b>	<b>0.36</b>					<b>31.1</b>			<b>11.8</b>
<b>Общие потери от регулирования</b>												<b>304.04</b>

Рисунок 6. – Пример программного модуля локального уровня

На рисунке 7 представлен пример работы программного модуля на сетевом уровне.

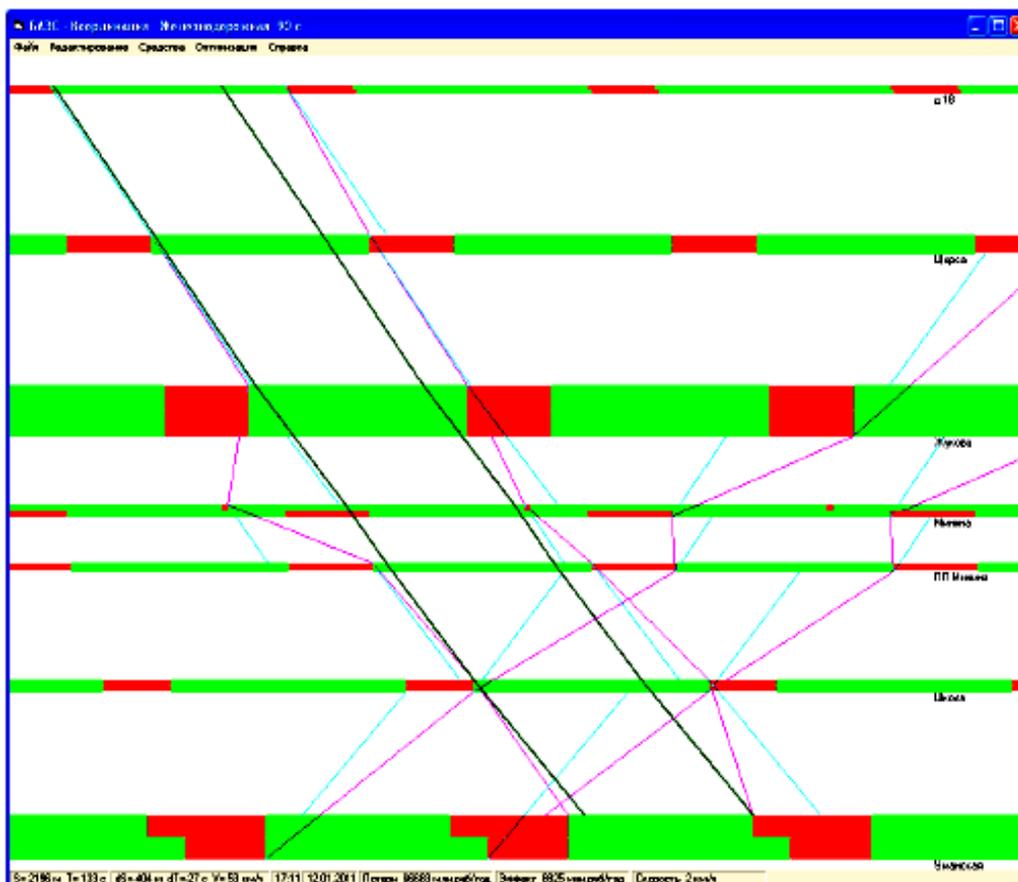


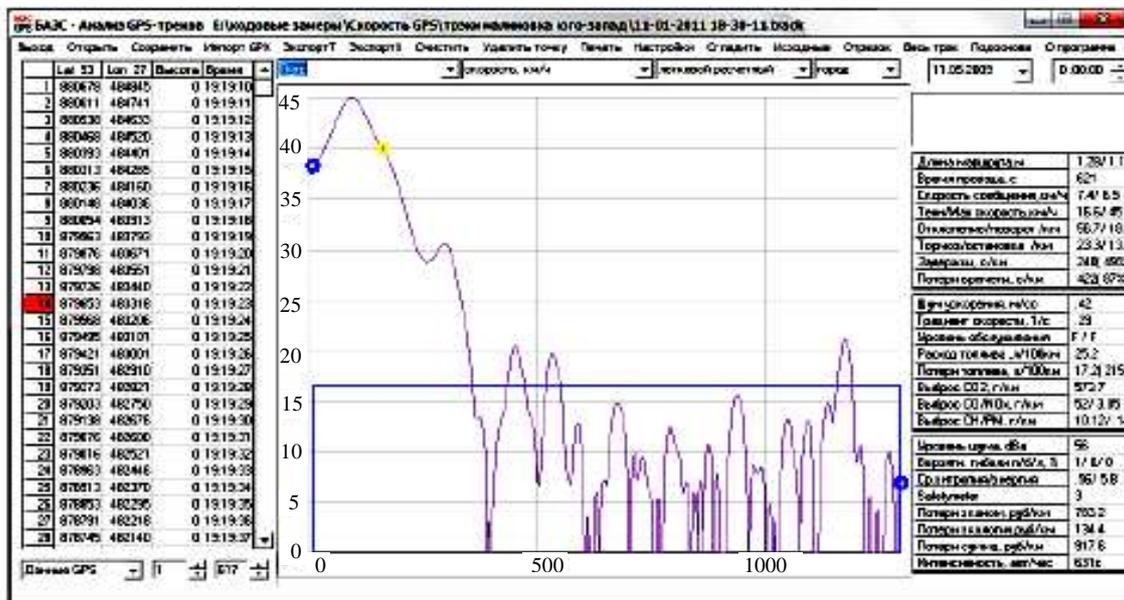
Рисунок 7. – Пример работы программного модуля на магистральном уровне

Оценка качества управляющих сценариев для конкретного плана координации проводится на основании сравнения ситуаций «до» и «после».

На рисунке 8 приведен пример оценки качества координации с помощью gps-трекера.

Улица Брытала от Гурского к Алибегова

ДО



ПОСЛЕ

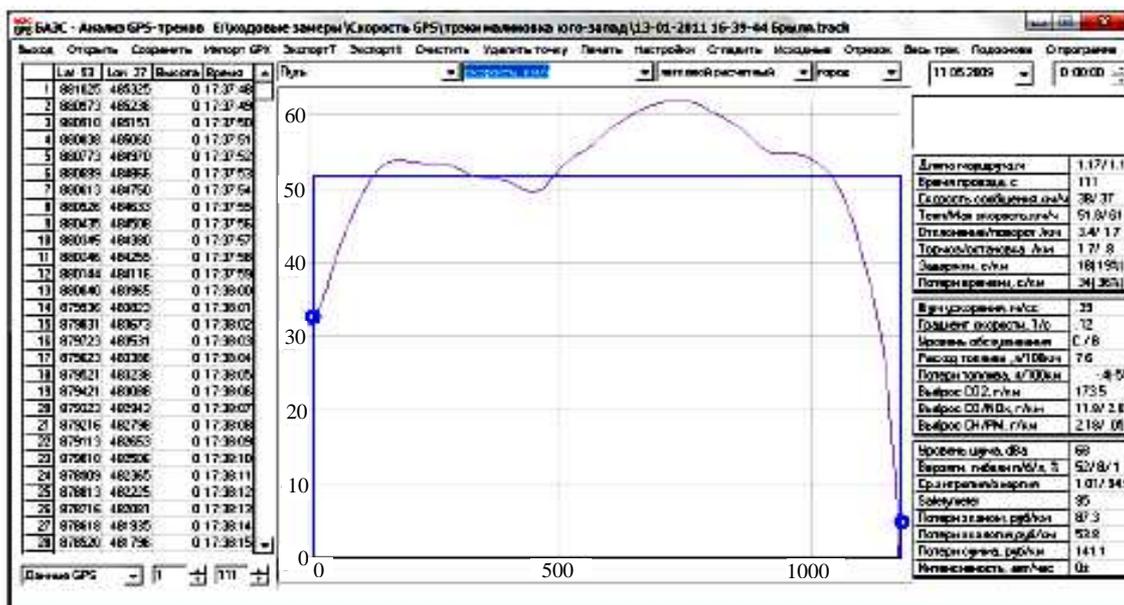


Рисунок 8. – Пример оценки качества координации с помощью gps-трекера

Система отображения программно-технического комплекса центрального управляющего пункта (ПТК ЦУП) реализуется путем визуализации информации о функциональном состоянии периферийных устройств на улично-дорожной сети, параметров транспортных потоков от детекторов транспорта, а также видеоинформации.

Видеоинформация в программно-техническом комплексе ЦУП автоматизированной системы управления дорожным движением поступает как от видеодетекторов транспорта, так и от системы видеонаблюдения в местах массового скопления граждан. Пример работы видеодетектора транспорта представлен на рисунке 9.

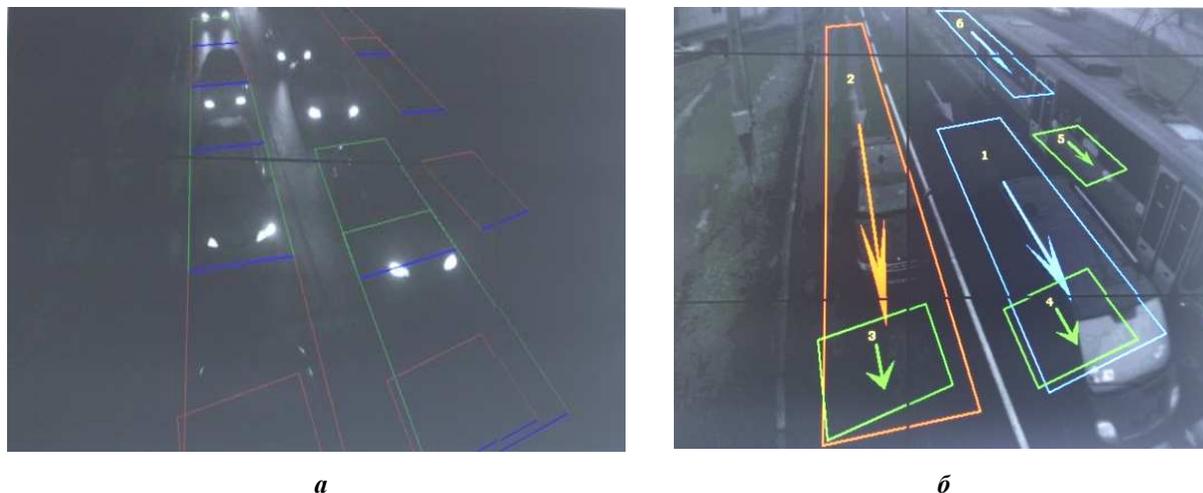


Рисунок 9. – Работа видеодетекторов транспорта в ночное (а) и дневное (б) время суток

Конфигурация зала управления программно-технического комплекса центрального управляющего пункта АСУДД и системы видеонаблюдения представлена на рисунке 10.



Рисунок 10. – Зал управления программно-технического комплекса центрального управляющего пункта автоматизированной системы управления дорожным движением с системой видеонаблюдения

#### **Другое программное обеспечение программно-технического комплекса центрального управляющего пункта автоматизированной системы управления дорожным движением**

Программное обеспечение программно-технического комплекса центрального управляющего пункта автоматизированной системы управления дорожным движением обеспечивает централизованное и децентрализованное управление светофорными объектами.

Коммуникационный профиль заключается в следующем:

- для передачи данных на светофорные объекты используется протокол «Старт» и протокол GPRS-связи;
- для подключения каналаобразующей аппаратуры (КЗЦ-М1) используется интерфейс CAN2.0, интерфейс RS-232 – для подключения GPRS-модема;
- сервер управления дорожным движением реализуется на управляющем вычислительном комплексе;
- обмен информации с базой данных осуществляется по протоколу Net8, с АРМами по протоколу TCP/IP с использованием протокола Sockets;

- в качестве сервера базы данных используется система управления базами данных ORACLE;

- для передачи данных от видеокamer и видеодетекторов используются оптоволоконные каналы.

**Дорожные контроллеры являются основным периферийным оборудованием АСУДД**

Для подключения дорожных контроллеров к центру управления используется два вида связи:

- проводная (телефонные линии связи);
- беспроводная (GPRS-связь).

Программно-технический комплекс центрального управляющего пункта автоматизированной системы управления дорожным движением позволяет подключить к системе до 640 дорожных контроллеров по проводным линиям связи и до 200 по беспроводным.

Обмен информацией между дорожными контроллерами и центром управления осуществляется по проводным линиям связи ежесекундно, по GPRS-связи по запросам – каждые 4 минуты.

К дорожным контроллерам подключается дополнительное периферийное оборудование:

- детекторы транспорта (ДТ);
- табло вызывное пешеходное (ТВП);
- указатели скорости (УСК);
- табло предварительного информирования (ТПИ).

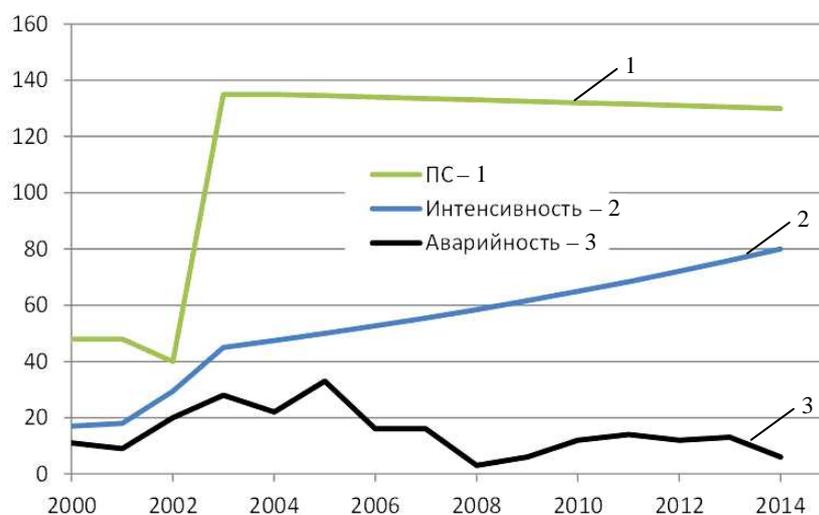
В дорожных контроллерах белорусских производителей реализованы следующие функции управления: ручное управление; управление по графику; управление на основе информации от детекторов транспорта; координированное управление; диспетчерское управление; зеленая улица (режим пропуска спецтранспорта); управление от вызывных кнопок.

В Минске используются контроллеры нескольких типов: Peek, ДУМКА и БДКЛ-М.

**Цели АСУДД города Минска в составе интеллектуальной транспортной системы**

Интеллектуальная транспортная система, являясь общемировым трендом, позволяет кардинальным образом улучшить качество дорожного движения. Автоматизированная система управления дорожным движением и другие подсистемы в составе ИТС являются инструментами реализации целей по повышению безопасности и комфорта дорожного движения [13; 14].

Анализируя тенденции изменения транспортной нагрузки в городе Минске (рис. 11), отметим, что, несмотря на существенный рост автомобилизации, аварийность снижается [15].



Интенсивность и пропускная способность – тысяч автомобилей в сутки  
Аварийность – количество погибших в год

Рисунок 11. – Тенденции изменения транспортной нагрузки

Исходя из тенденций изменения транспортной нагрузки и анализа аварийности, на рисунке 12 представлены цели по реализации ИТС и АСУДД в ее составе.

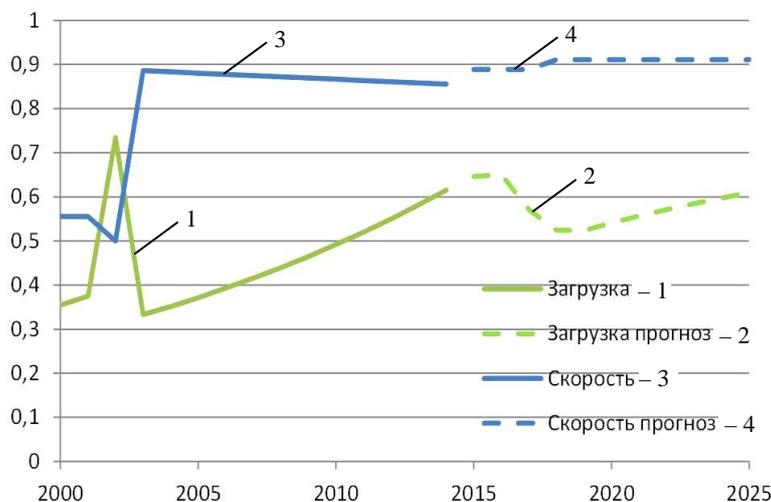


Рисунок 12. – Цели интеллектуальной транспортной системы города Минска

В рамках экономической стратегии, ставя целью повышение качества жизни населения города за счет снижения транспортных потерь, можно сформировать экономическую стратегию благодаря внедрению ИТС и АСУДД в ее составе как основного компонента (табл. 1) [16; 17].

Таблица 1. – Экономическая стратегия за счет внедрения ИТС и АСУДД

Компоненты	Статьи выгод	Масштаб, млн. USD / год
Экономика	Снижение потерь из-за альтернативного использования МКАД вместо городской территории.	20...10
	Снижение потерь из-за увеличения скорости сообщения	6...3
Безопасность	Сохранение жизни и здоровья.	3...1,5
	Снижение числа и ликвидация инцидентов	2...1
Экология	Снижение потерь из-за альтернативного использования МКАД вместо городской территории	6...3
МКАД – Минская кольцевая автомобильная дорога.		

**Заключение.** Установлено, что рост автомобилизации вызвал ряд проблем, среди которых низкая скорость сообщения, плохие режимы движения, наличие перегрузок и повышенный уровень аварийности. Поэтому повышения качества дорожного движения можно достичь с помощью совершенствования организации дорожного движения и создания интеллектуальной транспортной системы города Минска. Интеллектуальная транспортная система, являясь общемировым трендом, позволяет кардинальным образом улучшить качество дорожного движения.

Автоматизированная система управления дорожным движением и другие подсистемы в составе ИТС являются инструментами реализации целей по повышению безопасности и комфорта дорожного движения. Целесообразно в качестве базовой для ее создания выбрать автоматизированную систему управления дорожным движением, которая имеет соответствующие функциональные, структурные, организационные и институциональные резервы для своего развития. Отдельно разработаны технологические требования к функционированию целостной системы, которые касаются уровня эффективности, в том числе и аварийности на участках уличной дорожной сети, входящих в создаваемую систему. Внедрение автоматизированной системы управления дорожным движением в интеллектуальную транспортную систему позволит снизить аварийные, экономические и экологические, а также социальные потери в дорожном движении не менее чем на 15% от существующего их уровня, несмотря на рост автомобилизации в городе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2015 году : аналитич. сб. / сост.: О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2016. – 89 с.

2. 2013 Motor Vehicle Crashes : Overview / TRAFFIC SAFETY FACTS Research Note /NHTSA's National Center for Statistics and Analysis / DOT HS 812 101 / December 2014 / file: /C:/Users/den/Desktop/812101.pdf.
3. Road traffic accidents involving personal injury, November 2014 // Statistics Norway [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: <http://www.ssb.no/en/transport-og-reiseliv/statistikker/vtu>. – Date of access: 16.05.2015.
4. Accident rate information // Lithuanian Road Administration under the Ministry of Transport and Communications [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access: [http://www.lra.lt/en.php/traffic\\_safety/accident\\_rate\\_information/106](http://www.lra.lt/en.php/traffic_safety/accident_rate_information/106). – Date of access: 20.03.2016.
5. Albalatea, D. The Road against Fatalities: Infrastructure Spending vs. Regulation? [Electronic resource] / Daniel Albalatea, Laura Fernández, Anastasiya Yarygina ; University of Barcelona, (GiM-IREA), Departament de Política Econòmica i Estructura Econòmica Mundial, Av. Diagonal 690. – Barcelona (Spain). – Mode of access: <http://www.alde.es/encuentros/anteriores/xvievea/trabajos/a/pdf/100.pdf>. – Date of access: 20.03.2016.
6. Капский, Д.В. Метод прогнозирования дорожно-транспортной аварийности по потенциальной опасности / Д.В. Капский. – М. : Новое знание, 2015. – 327 с.
7. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2014 году : аналит. сб. / сост.: О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2015. – 89 с.
8. CSNg dati Latvijā (2000–2014 g.) // CSDD – [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: [http://www.csdd.lv/lat/noderiga\\_informacija/statistika/celu\\_satiksmes\\_negadījumi/?doc=523](http://www.csdd.lv/lat/noderiga_informacija/statistika/celu_satiksmes_negadījumi/?doc=523). – Date of access: 16.05.2015.
9. Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999–2008 годах и наметившиеся тенденции : аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, А.А. Сушко, О.Г. Ливанский ; под общ. ред. А.Н. Кулешова. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2009. – 144 с.
10. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2011 году : аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск : Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2012. – 89 с.
11. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
12. Капский, Д.В. Аварийность в дорожном движении. Исследование дорожно-транспортных происшествий с помощью страховой статистики / Д.В. Капский // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 48–54.
13. Аудит безопасности дорожного движения / Д.В. Капский [и др.] ; науч. ред. Д.В. Капского ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 428 с.
14. Капский, Д.В. Аварийность в дорожном движении. Исследование дорожно-транспортных происшествий с помощью страховой статистики / Д.В. Капский // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 48–54.
15. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
16. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
17. Капский, Д.В. Разработка методики определения экономических потерь при координированном регулировании транспортно-пешеходных потоков / Д.В. Капский, Д.В. Навой // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : междунар. сб. науч. тр. / Тихоокеан. гос. ун-т ; редкол.: А.И. Ярмолинский, И.Ю. Белуцкий, П.А. Пегин. – Хабаровск, 2009. – № 9. – С. 12–31.

Поступила 12.12.2016

## CREATION OF THE INTELLECTUAL TRANSPORT SYSTEM OF LARGEST CITIES

*D. KAPSKY, D. NAVOY*

*An analysis of the characteristics of the transport system in Minsk taking into account the modernization of the automated traffic management system of the city is presented. On the basis of the results obtained, technological requirements for the functioning of an integrated system have been developed that relate to the level of efficiency, including accidents at the sections of the road and road network that are part of the system being created. In the future, it is planned to create an integrated intellectual transport system of the country.*

**Keywords:** *traffic organization, safety, automated traffic control system, intelligent transport systems, efficiency, coordinated regulation.*

УДК 656.13.08

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАЙОНА ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ В ГОРОДЕ МИНСКЕ

**В.Н. КУЗЬМЕНКО, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ, А.В. КОРЖОВА, А.С. ПОЛХОВСКАЯ,  
Н.С. ЕРМАКОВА, Н.В. КИСЕЛЕВИЧ, Е.Н. ГОРЕЛИК, И.К. ГАМУЛЬСКИЙ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассмотрены условия движения и транспортного обеспечения в районе застройки, ограниченной улицами М. Богдановича, Измайловская, Л. Беды, ул. Некрасова, ул. Корш-Саблина, Гало и ул. Тиражная. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по улучшению условий движения и повышению качества дорожного движения.*

**Ключевые слова:** дорожное движение, организация дорожного движения, безопасность, условия движения, проектные решения, светофорное регулирование, координированное регулирование.

Дорожное движение – сложный технико-социальный процесс, в котором участвует все население любой страны, и оно должно быть организовано таким образом, чтобы издержки движения были минимальны, а комфортность и безопасность участников движения – максимальны [1–3]. Организация дорожного движения (ОДД) – неотъемлемая составляющая проектов транспортной планировки городов и районов. Однако в Беларуси до сих пор она включается в состав работ, входящих в дорожную деятельность по содержанию автомобильных дорог и улиц. При этом уровень потерь, возникающий от несовершенства ОДД, огромен и сопоставим с потерей 8% ВВП [3–5]. Это обусловило отношение к проблемам ОДД, которые не рассматриваются на должном уровне с точки зрения необходимой регламентации, учета и контроля особенно на градостроительном. Повышение качества ОДД обеспечивает требуемую пропускную способность дорожной сети наряду с ее развитием, совершенствование парковочной политики и рациональное использование парковочного пространства, оптимальное управление светофорными объектами. Вместе с тем следует отметить, что необходимо переосмыслить роли ОДД как в проектных решениях, так и в их реализации, с целью придания ей заслуженной значимости. Без этого издержки так и останутся регулярным и нарастающим явлением, что неизбежно приведет к потере устойчивости функционирования транспортных систем в целом [3; 6–8].

Для обоснования вариантов транспортного обслуживания проводились исследования интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков, которые велись на основных распределяющих узлах въезда/выезда в проектируемый микрорайон. Исследования были проведены на объектах исследуемой сети (рис. 1).

Интенсивность и состав транспортных потоков определялись путем натурного эксперимента по методике Белорусского национального технического университета в рабочие дни недели [1; 2].

Исходные данные обработаны в программном комплексе «RTF-Road traffic flows» [11], в результате чего получены картограммы интенсивности и неравномерности движения, диаграммы состава потока и таблицы параметров. Результаты выходной информации в виде рисунков 2–6 фрагментарно приведены ниже.

**Анализ условий движения транспортных и пешеходных потоков. Проектируемый район строительства** расположен на месте существующей жилой малоэтажной застройки в границах улиц Тиражная – Гало – Верхняя – Тургенева в Советском районе города Минска. Улицы Тиражная, Гало, Верхняя, Тургенева, Корш-Саблина являются улицами местного значения (ТКП 45-3.03-227), обеспечивают транспортное сообщение в пределах микрорайона и выполняют распределяющую функцию.

Транспортное обслуживание указанного микрорайона обеспечивается магистральными улицами: ул. М. Богдановича (общегородского значения), ул. Беды (общегородского значения) и ул. Некрасова (районного значения).

Основные существующие пешеходные потоки формируются близлежащей жилой и торгово-офисной застройкой, остановочными пунктами и социально-бытовыми объектами, которые определяют варианты проектируемых улиц [12].

Застройка территории домами повышенной этажности (от 19 до 25 этажей), проектируемой в границах улиц Богдановича, Л. Беды, Некрасова, Лукьяновича, приведет к значительному увеличению количества жителей и, соответственно, интенсивности движения транспортно-пешеходных потоков на указанных улицах и внутри микрорайона. При этом интенсивность движения по улицам внутри микрорайона возрастет в 3...5 раз, а по магистральным улицам увеличится на 20...50%, в зависимости от схем

организации дорожного движения, условий движения и транспортных связей внутри микрорайона и въезда/выезда на улично-дорожную сеть города.

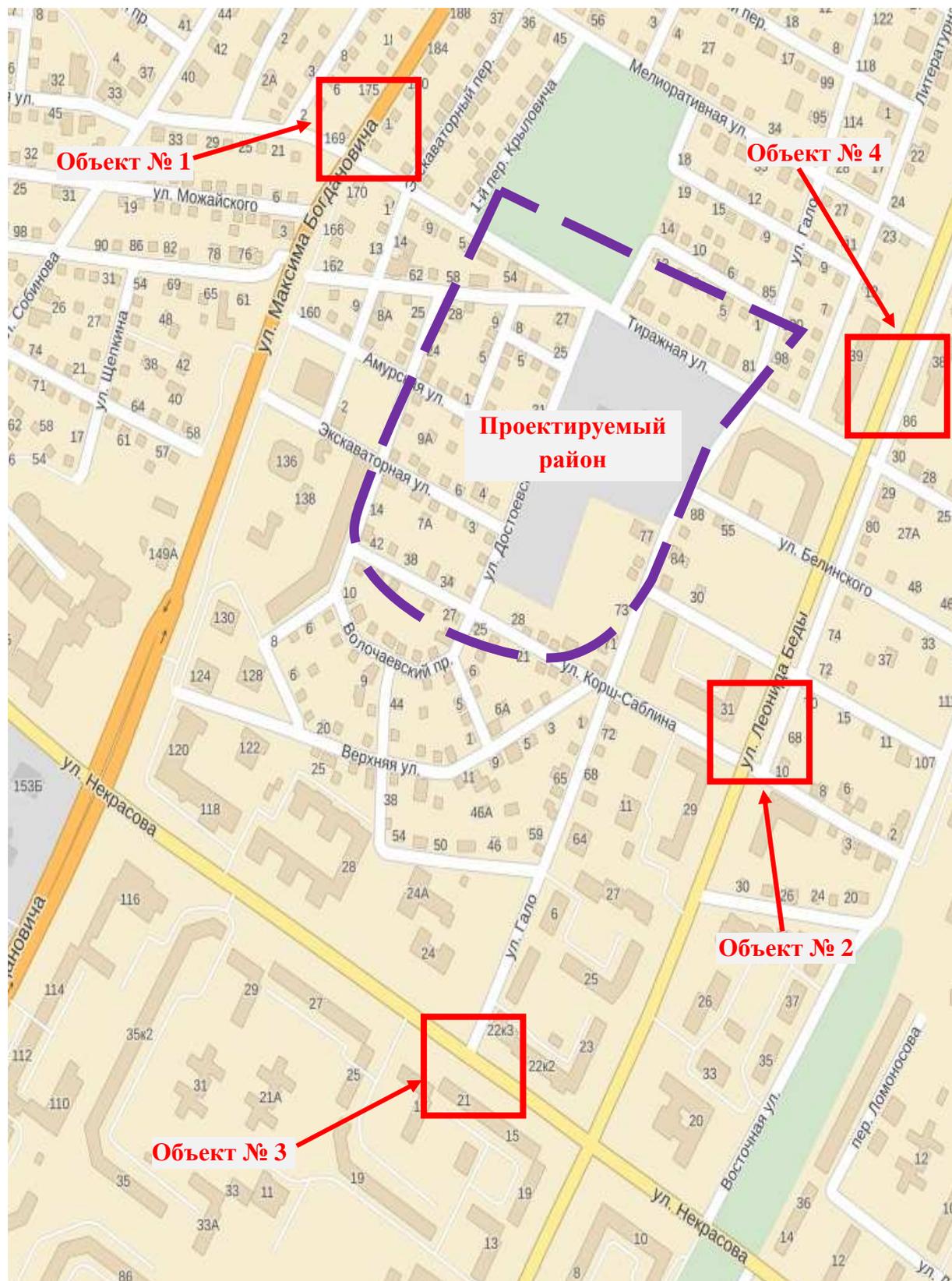


Рисунок 1. – Схема исследуемого участка улично-дорожной сети

ул. М. Богдановича – ул. Измайловская (D – со стороны ул. Некрасова)

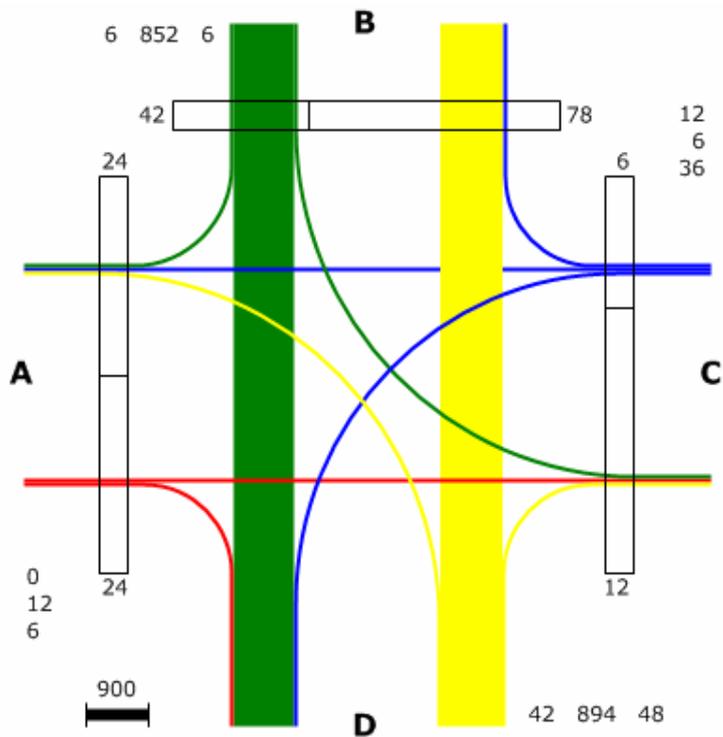


Рисунок 2. – Картограмма средней интенсивности движения на перекрестке улиц М. Богдановича и Измайловская

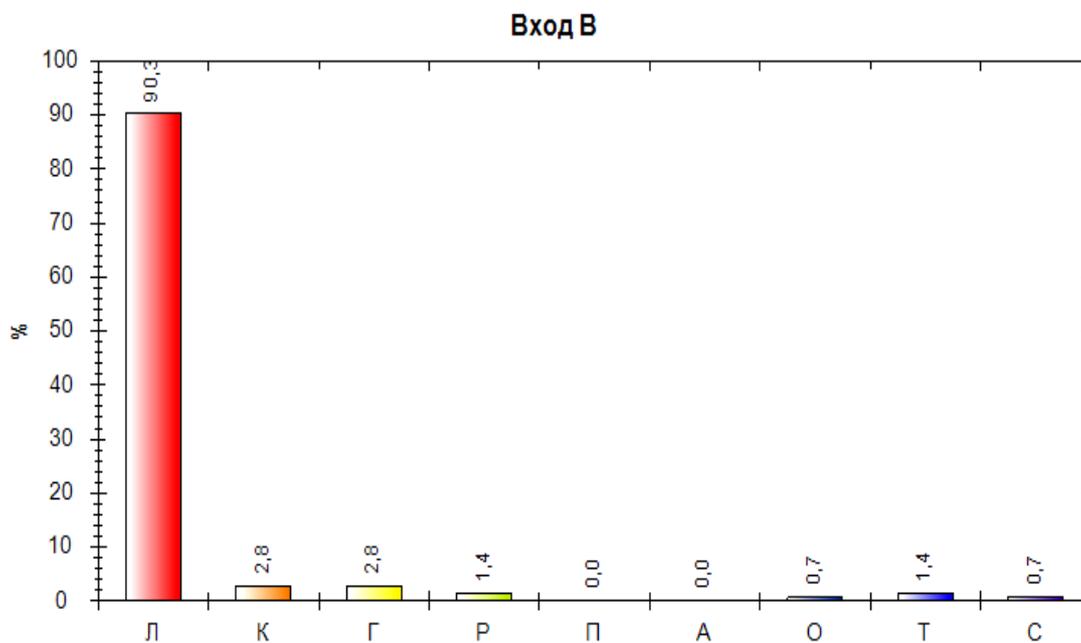


Рисунок 3. – Диаграмма состава транспортного потока на входе В

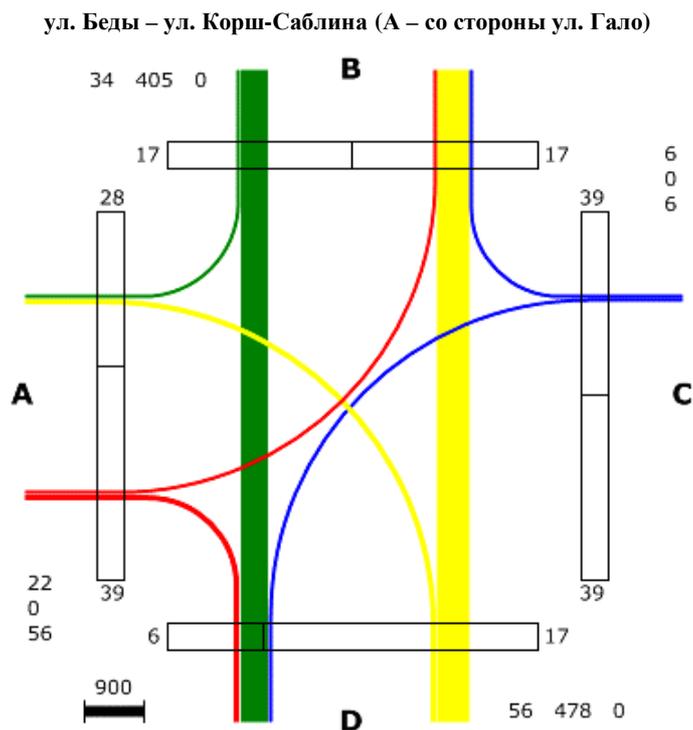


Рисунок 4. – Картограмма средней интенсивности движения на перекрестке ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина

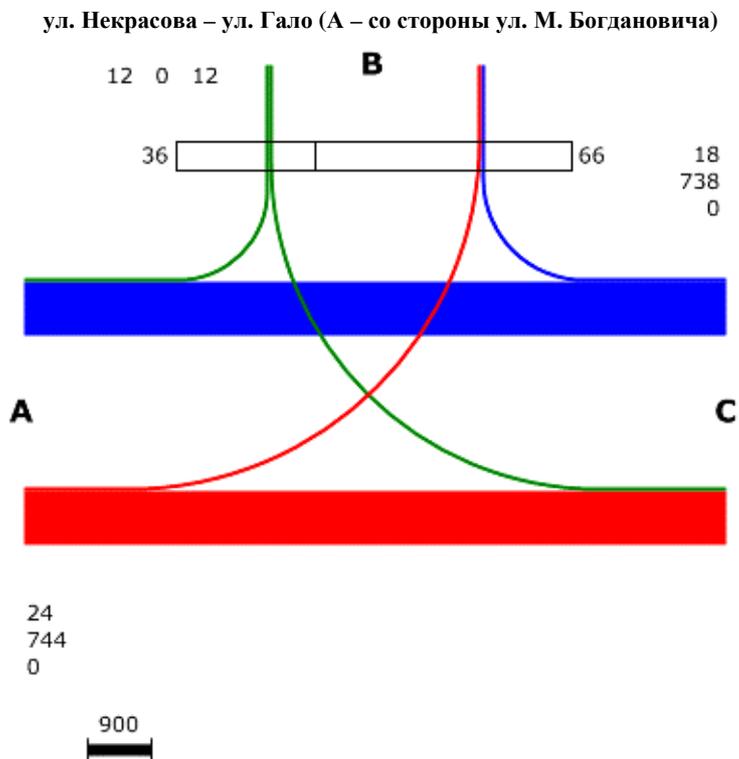


Рисунок 5. – Картограмма средней интенсивности движения на перекрестке ул. Некрасова – ул. Гало

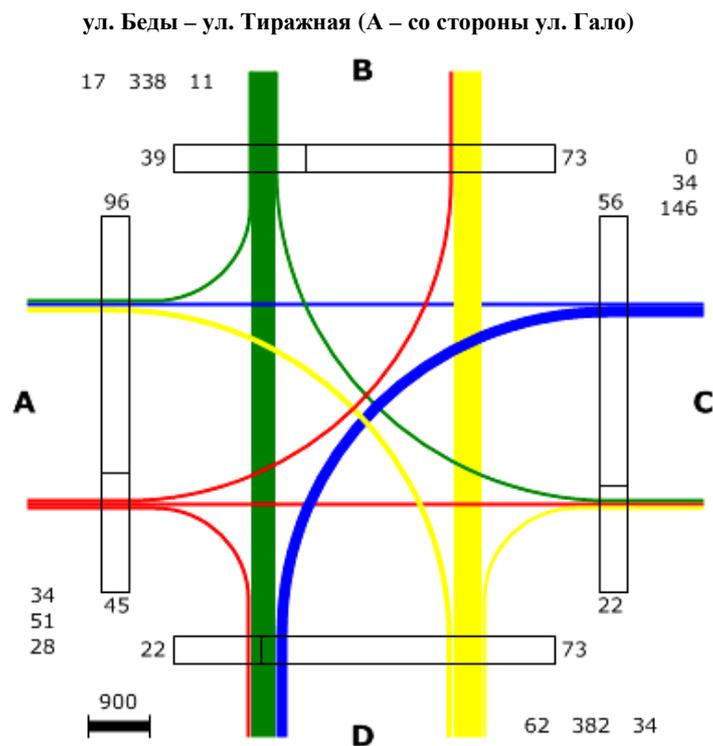


Рисунок 6. – Картограмма средней интенсивности движения на перекрестке ул. Л. Беда – ул. Тиражная

#### Распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта

Исходными данными для расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта является информация об основных технико-экономических показателях проектируемой застройки территории, предоставленных застройщиком.

В соответствии с ведомостями жилых и общественных зданий и сооружений территория проектируемой застройки разработана со следующими параметрами (ориентировочно):

Количество машино-мест на подземных парковках	1 800
Ориентировочное число гостевых стоянок (наземных)	400
Количество квартир	2 600
Площадь помещений коммерческого назначения на первых этажах жилой застройки, м <sup>2</sup>	8 000

Расчет перспективной интенсивности движения основан на количестве проектируемых машино-мест для жильцов микрорайона и площади помещений коммерческого назначения на первых этажах жилой застройки.

Интенсивность движения складывается из количества транспортных средств, въезжающих и выезжающих с территории проектируемой зоны комплексной застройки:

- автомобилей жилой застройки (жители микрорайона);
- автомобилей помещений коммерческого назначения (сотрудников офисов, прибывающих к началу рабочего дня в утренний «час пик» и выезжающих в конце рабочего дня в вечерний «час пик»; посетителей офисов приезжающих на территорию микрорайона и выезжающих в течение рабочего дня и в вечерний «час пик»; сотрудников офисов, совершающих въезды и выезды на территорию, связанные со служебной необходимостью);
- автомобилей общественной застройки (школа, детский сад) (родители привозят детей утром в «час пик», забирают в течение рабочего дня или вечером).

Результаты расчета распределения пиковой интенсивности движения транспорта, въезжающего и выезжающего с территории проектируемого объекта по основным направлениям, для первоначального варианта (с учетом проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская) представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Перспективная пиковая интенсивность движения транспортных средств (с учетом проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская)

Пути подъезда к проектируемой зоне	Перспективная интенсивность движения транспортных средств, выезжающих на территорию объекта в «час пик» (вечер), авт/ч	Перспективная интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории объекта в «час пик» (утро), авт/ч
ул. Богдановича – ул. Измайловская	359	337
ул. Некрасова – ул. Гало	483	453
ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	285	267
ул. Л. Беды – ул. Тиражная	111	105
<b>ВСЕГО</b>	<b>1239</b>	<b>1163</b>

Распределение перспективной интенсивности движения транспорта для первоначального варианта (с учетом проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская) приведено в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. – Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих на территорию микрорайона

(Первоначальный вариант)

Пути подъезда к проектируемой зоне		Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих на территории проектируемого района					
		утренний «час пик»	утренний «час пик»	день	день	вечерний «час пик»	вечерний «час пик»
		жильцы	посетители	жильцы	посетители	жильцы	посетители
ул. Богдановича – ул. Измайловская	от ул. Лукьяновича	14	9	28	26	81	18
	от пл. Бангалор	37	23	75	69	212	49
ул. Некрасова – ул. Гало	от ул. Беды	32	20	64	59	181	42
	от ул. Богдановича	37	23	75	69	212	49
ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	от ул. Некрасова	34	21	67	63	191	44
	от ул. Лукьяновича	7	4	14	13	40	9
ул. Л. Беды – ул. Тиражная	от ул. Некрасова	9	6	18	17	50	12
	от ул. Лукьяновича	7	4	14	13	40	9
<b>ВСЕГО</b>		<b>178</b>	<b>110</b>	<b>355</b>	<b>330</b>	<b>1008</b>	<b>231</b>

Таблица 3. – Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории микрорайона

(Первоначальный вариант)

Пути выезда из проектируемой зоны		Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории проектируемого района					
		утренний «час пик»	утренний «час пик»	день	день	вечерний «час пик»	вечерний «час пик»
		жильцы	посетители	жильцы	посетители	жильцы	посетители
ул. Богдановича – ул. Измайловская	к ул. Лукьяновича	86	7	28	26	21	18
	к пл. Бангалор	227	17	75	69	56	49
ул. Некрасова – ул. Гало	к ул. Беды	194	15	64	59	48	42
	к ул. Богдановича	227	17	75	69	56	49
ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	к ул. Некрасова	205	16	67	63	51	44
	к ул. Лукьяновича	43	3	14	13	11	9
ул. Л. Беды – ул. Тиражная	к ул. Некрасова	54	4	18	17	13	12
	к ул. Лукьяновича	43	3	14	13	11	9
<b>ВСЕГО</b>		<b>1080</b>	<b>83</b>	<b>355</b>	<b>330</b>	<b>266</b>	<b>231</b>

**Второй вариант (без учета проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская)**

На основании изменений произведен перерасчет распределения перспективной интенсивности движения транспорта. Изменения предусматривают исключение проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская.

Результаты расчета распределения пиковой интенсивности движения транспорта, въезжающего и выезжающего с территории проектируемого объекта по основным направлениям, для второго варианта (без учета проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская) представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Перспективная пиковая интенсивность движения транспортных средств (без учета проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская)

Пути подъезда к проектируемой зоне	Перспективная интенсивность движения транспортных средств, въезжающих на территорию объекта в «час пик» (вечер), авт/ч	Перспективная интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории объекта в «час пик» (утро), авт/ч
ул. Богдановича – ул. Измайловская	111	105
ул. Некрасова – ул. Гало	681	640
ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	390	366
ул. Л. Беды – ул. Тиражная	56	52
<b>ВСЕГО</b>	<b>1239</b>	<b>1163</b>

Распределение перспективной интенсивности движения транспорта для второго варианта (без учета проектирования продолжения ул. Тургенева до ул. Измайловская) приведено в таблицах 5 и 6.

Следует отметить, что распределение перспективной интенсивности движения транспорта и условия движения в зоне проектируемого объекта и по прилегающим улицам в значительной степени зависит от размещения въездов и выездов с территории комплекса и их планировки, организации дорожного движения на прилегающих участках улично-дорожной сети (УДС), организации движения на территории проектируемого комплекса, а также от транспортной планировки УДС объекта и его узлов.

Таблица 5. – Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих на территорию микрорайона

(Второй вариант)

Пути подъезда к проектируемой зоне		Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих с территории проектируемого района					
		утренний «час пик»	утренний «час пик»	день	день	вечерний «час пик»	вечерний «час пик»
		жильцы	посетители	жильцы	посетители	жильцы	посетители
Ул. Богдановича – ул. Измайловская	от ул. Лукьяновича	7	4	14	13	40	9
	от пл. Бангалор	9	6	18	17	50	12
Ул. Некрасова – ул. Гало	от ул. Беды	32	20	64	59	181	42
	от ул. Богдановича	66	41	131	122	373	85
Ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	от ул. Некрасова	40	25	80	74	227	52
	от ул. Лукьяновича	16	10	32	30	91	21
Ул. Л. Беды – ул. Тиражная	от ул. Некрасова	3	2	5	5	15	3
	от ул. Лукьяновича	5	3	11	10	30	7
<b>ВСЕГО</b>		<b>178</b>	<b>110</b>	<b>355</b>	<b>330</b>	<b>1008</b>	<b>231</b>

Таблица 6. – Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории микрорайона

(Второй вариант)

Пути выезда из проектируемой зоны		Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории проектируемого района					
		утренний «час пик»	утренний «час пик»	день	день	вечерний «час пик»	вечерний «час пик»
		жильцы	посетители	жильцы	посетители	жильцы	посетители
ул. Богдановича – ул. Измайловская	к ул. Лукьяновича	43	3	14	13	11	9
	к пл. Бангалор	54	4	18	17	13	12
ул. Некрасова – ул. Гало	к ул. Беды	194	15	64	59	48	42
	к ул. Богдановича	400	31	131	122	99	85
ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина	к ул. Некрасова	243	19	80	74	60	52
	к ул. Лукьяновича	97	7	32	30	24	21
ул. Л. Беды – ул. Тиражная	к ул. Некрасова	16	1	5	5	4	3
	к ул. Лукьяновича	32	2	11	10	8	7
<b>ВСЕГО</b>		<b>1080</b>	<b>83</b>	<b>355</b>	<b>330</b>	<b>266</b>	<b>231</b>

**Заключение.** При реализации очередей строительства необходима реконструкция, как минимум, прилегающих к микрорайону перекрестков: ул. Богдановича – ул. Измайловская, ул. Некрасова – ул. Гало, ул. Л. Беды – ул. Корш-Саблина. Для обеспечения нормативных значений уровня обслуживания необходимо выделить специализированные поворотные полосы, устройство «полного» или иных вариантов светофорного регулирования и иных мер по обеспечению безопасности и качества дорожного движения.

Первоначальный вариант способствует более равномерному распределению транспортных потоков по направлениям и по участкам улично-дорожной сети.

При реализации по второму варианту значительно перераспределяется интенсивность движения транспортных средств с ул. Богдановича, Измайловская на ул. Некрасова, Гало.

Учитывая количество квартир в проектируемом комплексе и позиционирование проектируемого объекта как жилье повышенной комфортности, потребность в машино-местах для жителей микрорайона возрастет и будет ориентировочно соответствовать количеству квартир, достигая значений 2500...3000. В данном случае расчетные значения перспективной интенсивности увеличатся на 20...30%.

Существенное влияние на степень использования паркингов и загруженности улиц припаркованными автомобилями окажет стоимость и условия пользования машино-местами в подземных паркингах. В первую очередь, как правило, заполняются все возможные наземные места парковки автомобилей (как разрешенные, так и запрещенные), что ухудшает условия для движения транспорта и пешеходов в зоне застройки без соответствующих превентивных мероприятий.

Условия пользования паркингами и наземными парковками (платно/бесплатно, удобно/неудобно и другие факторы) влияют на формирование транспортных потоков не только внутри микрорайона, но и при выезде из него на магистральные улицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении : пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – 3-е изд., дораб. – Минск : БНТУ, 2010. – 139 с.
2. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
3. Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности : в 2-х т. / Д.В. Капский. – Минск, 2013. – Т. 1. – 282 с.
4. Постановление расширенного заседания коллегии Министерства транспорта Рос. Федерации от 24.10.12 2012 г. № 3.
5. Врубель, Ю.А. Опасности в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – М. : Новое знание, 2013. – 244 с.

6. Ваксман, С.А. Моделирование ДТП – градостроительный аспект / С.А. Ваксман, Л.И. Свердлин // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : сб. докл. шестой междунар. конф. / СПбГАСУ. – СПб., 2004. – С. 305–307.
7. Трофименко, Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М. : Логос, 2013. – 464 с.
8. Ваксман, С.А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С.А. Ваксман, Ф.Г. Глик, Д.В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы седьмой междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 267–268.
9. Транспорт в планировке городов : пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения» / Д.В. Капский, А.В. Коржова, С.В. Скиркоцкий. – Минск : БНТУ, 2015. – 144 с.
10. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
11. Свидетельство № 222 от 17.09.10 г. о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова, В.Н. Кузьменко, А.С. Полховская, Е.Н. Костюкович.
12. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования = Вулицы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання : ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 01.07.2011. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.

Поступила 19.12.2016

#### EVALUATION OF TRANSPORT SERVICE RESIDENTIAL AREAS IN MINSK

V. KUZMENKO, D. MOZALEVSKII, A. KORZOVA, A. POLKHOVSKAYA, N. ERMAKOVA,  
N. KISILEVICH, E. GORELICK, I. GAMULSKI

*The conditions of traffic and transportation in the area of development, limited to the streets of M. Bogdanovich, Izmailovskaya, L. Bedi, Nekrasov Street, Korsh-Sablin Street, Galo and Tyraznaya streets. Based on the results obtained, recommendations have been developed to improve traffic conditions and improve the quality of traffic.*

**Keywords:** road traffic, traffic management, security, investigations, road traffic conditions, design solutions, improving road safety, traffic signalization, traffic lights, coordinated regulation.

УДК 621.891.2

## ВЫБОР СОСТАВА ПРИРАБОТОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК; д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ*  
*(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);*

*А.П. ЯЛОВИК*

*(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);*

*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН*

*(Полоцкий государственный университет)*

*Анализируются существующие методы триботехнической обработки поверхностей трения деталей машин. Показано, что трибомеханическая обработка в присутствии прирабочной композиции, содержащей наноразмерные твердые добавки, относится к числу эффективных методов повышения работоспособности узлов трения. Установлено, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования газотермических стальных покрытий с высоким содержанием остаточного аустенита наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы 1-й или 2-й категории пенетрации по классификации NLGI. Определено необходимое содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в пластичной смазке. Установлены пределы размера наночастиц в процесс приработки, удельная нагрузка, скорости скольжения, зависимость продолжительности трибомеханической обработки от пути трения.*

**Ключевые слова:** *триботехнология, трибомеханическая обработка, прирабочная композиция, твердые наноразмерные добавки, стальные газотермические покрытия.*

**Введение.** Триботехнология – это направление в трибологии, предметом исследования и разработки которой являются технологические методы управления трибологическими характеристиками (трение, износостойкость) трибосопряжений. Триботехнология является новой перспективной технологической отраслью, направленной на повышение триботехнических свойств поверхностей трения и увеличение ресурса работы трибосопряжений. В основу триботехнологии положен принцип преобразования разрушительного действия силы трения в созидательный процесс упрочнения и восстановления поверхностей трения, принцип управления процессами физико-химических превращений, происходящих на поверхности трения под термомеханическим воздействием при фрикционном контакте. Её цель – формирование в поверхностном слое структур с пониженной энергией сдвига либо повышенным сопротивлением зарождению усталостных трещин, а также восстановление изношенного поверхностного слоя.

Современная триботехнология располагает большим числом технологических методов, используемых в течение многих десятилетий или разработанных в последние 10–15 лет. Триботехнология включает в себя формирование покрытий наплавкой трением, при которой расплавление материала наносимого покрытия осуществляется за счет тепла, выделяющегося при трении присадочного материала о наплавляемую поверхность детали [1–4].

К числу наиболее известных явлений, используемых в триботехнологии, относится избирательный перенос. Избирательный перенос при трении, или так называемый «эффект безызносности», реализуется в результате протекания на поверхности контактирующих тел химических и физических процессов, приводящих к образованию самоорганизующихся систем автокомпенсации износа и снижения коэффициента трения [5; 6]. На принципах избирательного переноса основываются способы финишной антифрикционной безабразивной обработки поверхностей трения, при которых натиранием на обрабатываемую поверхность наносится тонкий слой пластичного материала, обладающего повышенными антифрикционными свойствами [7; 8].

Известен широкий класс металлоплакирующих смазочных материалов, содержащих в своем составе ультрадисперсные порошки мягких металлов или их химические соединения. Принцип действия этих смазочных материалов состоит в формировании на участках фактического контакта защитных пленок, которые, локализуя в себе сдвиговые деформации при трении, уменьшают силовое взаимодействие и интенсивность изнашивания сопряженных поверхностей [9; 10]. Составной частью триботехнологии также являются способы восстановления поверхностей трения в режиме непрерывающейся эксплуатации с применением добавок к смазочным материалам, содержащих дисперсные природные слоистые силикаты. Применение подобных добавок способно обеспечить восстановление изношенных поверхностей с формированием на поверхностях трения металлокерамических покрытий, имеющих повышенную износостойкость [11; 12].

К триботехнологии следует также отнести технологические приемы повышения триботехнических свойств пар трения и увеличения ресурса трибосопряжений путем их приработки в присутствии смазочного материала, содержащего наноразмерные твердые компоненты, в частности наноразмерные алмазы, получившие название трибомеханического модифицирования [13–15]. Твердые наноразмерные частицы, введенные в состав смазочной среды, оказывают комплексное воздействие на трибосистему, увеличивая ее долговечность. С одной стороны, наночастицы повышают физические и объемно-механические свойства смазочного материала, увеличивают несущую способность смазочного слоя; с другой – твердые наноразмерные частицы способны оказать положительное влияние на поверхность контактирующих тел, изменив их структуру в процессе фрикционного контакта. Применение смазочных материалов, модифицированных, твердыми наноразмерными добавками, обеспечивает интенсификацию прирабочных процессов в трибосопряжениях, расширение диапазона температурно-нагрузочных режимов эксплуатации узлов трения и повышение их ресурса. Эффективность трибомеханического модифицирования в значительной степени определяется структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя материалов пары трения, составом прирабочной композиции и нагрузочно-скоростными режимами трибоконтактного взаимодействия пары трения. Выбор состава смазочного материала для трибомеханической обработки композиционных стальных газотермических покрытий и является целью данной работы.

**Материалы и методы исследований.** Триботехнические испытания проводились на трибометре МТВП-9М, оснащенный устройством для измерения коэффициента трения и управляемом программным комплексом. Контртело – пластина из закаленной стали У8 твердостью 64...65 HRC (800 HV 30). Эффективность процесса трибомеханического модифицирования поверхности трения определялась на основе оценки характера изменения коэффициента трения в процессе приработки, уровня увеличения твердости прирабатываемой поверхности и продолжительности процесса приработки. Поверхность покрытия после газотермического напыления подвергалась механической обработке (шлифованию) до получения шероховатости поверхности, соответствующей параметру шероховатости  $Ra = 0,63...0,80$  мкм.

Отработка состава прирабочной композиции и режимов трибомеханического модифицирования осуществлялась на композиционных стальных газотермических покрытиях, полученных распылением следующих пар проволоочных материалов (табл. 1).

Таблица 1. – Варианты газотермических покрытий для отработки параметров трибомеханического модифицирования

№ образца	Марки напыляемых стальных проволок		Диаметр проволоки, мм		Соотношение диаметров проволоки, $D_1 / D_2$	Содержание остаточного аустенита, % об.
	проволока № 1	проволока № 2	$D_1$	$D_2$		
1	40X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	46
2	45X14H14B2M	12X18H10T	1,8	1,6	1,12	52
3	90X18MФ	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	60
4	95X18	12X18H10T	1,8	1,5	1,20	58
5	110X18M	12X25H16T7	1,8	1,5	1,20	60

Композиционные газотермические покрытия, полученные одновременным распылением стальных проволок аустенитного и мартенситного классов, характеризуются наличием метастабильной структуры с большим содержанием остаточного аустенита (46...60 об.%), который на начальной стадии эксплуатации по механизму деформационно-активируемого  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения способен трансформироваться в упрочняющий покрытие мартенсит деформации [16]. Наряду с этим трибомеханическое модифицирование сопровождается формированием в поверхностных слоях ячеистой субзеренной структуры, характеризующейся повышенной износостойкостью [15].

Отработка состава смазочного материала и режимов приработки осуществлялась на основе анализа процессов трибологического контактирования элементов узлов трения в присутствии модифицированных пластичных смазок, оценки особенностей взаимодействий наночастиц добавки с волокнами дисперсной фазы пластичных смазок и экспериментальных данных по исследованию свойств (твердость, коэффициент трения) поверхностных слоев газотермических стальных покрытий после приработки поверхности трения.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Эксплуатационные характеристики смазочных материалов в значительной степени определяются их вязкостными показателями. Для пластичных смазок этот показатель может быть охарактеризован пенетрацией как физико-химическое свойство пластичных смазок, которое показывает степень густоты, консистенцию смазки.

В сфере разработки, производства и применения пластичных смазок принята их классификация по консистенции, предложенная Американским национальным институтом пластичных смазок (National Lubricating Grease Institute (NLGI)), в которой консистенция пластичной смазки характеризуется числом

пенетрации, что является мерой погружения конуса стандартной массы в пластично-вязкую среду за определенное время при определенной температуре.

Количественно пенетрация определяется согласно ГОСТ 5346-78 или ASTM D 217. Определение консистенции смазки в соответствии с этими методиками осуществляется с помощью пенетрометра, имеющего специальный конус, который опускают на 5 секунд в смазку при температуре 25 °С; глубина погружения конуса измеряется и выражается в десятых долях миллиметра.

Существует девять категорий консистенции пластичных смазок по классификации NLGI (табл. 2):

- категории 000 и 00 представляют собой жидкие смазки, используемые в качестве альтернативы маслам в механизмах и централизованных системах смазки с малым сечением подающих каналов (например, в двигателях грузовых автомобилей), закрытых зубчатых передачах;
- категории 0 и 1 имеют полужидкую или очень мягкую консистенцию и применяются в централизованных системах смазки (например, промышленное оборудование, грузовые автомобили);
- категории 2 и 3 мягкой и полумягкой консистенции используются в основном для смазывания подшипников (категория 2 наиболее распространена среди пластичных смазок для легкового транспорта);
- категории 4 и 6 представляют исключительно густые смазки и используются, например, в тяжело-нагруженных открытых зубчатых передачах.

Таблица 2. – Классификация пластичных смазочных материалов по их консистенции

Категория NLGI	Число пенетрации $P$ (0,1 мм)	Консистенция
000	445...475	Очень жидкая
00	400...430	Жидкая
0	355...385	Полужидкая
1	310...340	Очень мягкая
2	265...295	Мягкая
3	220...250	Полутвердая
4	175...205	Твердая
5	130...160	Очень твердая
6	85...115	Особо твердая

Как указывалось выше, повышение триботехнических свойств поверхностей трения за счет реализации эффекта трибомеханического модифицирования достаточно эффективно протекает в присутствии пластичных смазочных материалов, содержащих наноразмерные алмазосодержащие добавки. Анализ взаимосвязи между консистенцией пластичной смазки и седиментационной устойчивостью образующейся композиции при введении в смазку наноразмерной добавки показывает, что в пластичных смазках с числом пенетрации выше  $P = 340$ , представляющих собой смазочные материалы полужидкой ( $P = 355...385$ ), жидкой ( $P = 400...430$ ) и очень жидкой ( $P = 445...475$ ) консистенции, твердые наноразмерные добавки легко агрегируются в субмикро- и микро-размерные образования, обуславливающие низкую седиментационную устойчивость смазочной композиции. Использование смазочных композиций этого класса пенетрации с модифицирующими алмазосодержащими добавками в качестве приработочных составов является неэффективным ввиду чрезмерного абразивного действия образующихся алмазосодержащих агрегатов. Причем смазки этого класса рекомендуются только для обслуживания узлов трения с хорошими уплотнительными устройствами, что сужает область применения предлагаемого технического решения.

Пластичные смазочные материалы с числом пенетрации ниже  $P = 265$  (полутвердая консистенция –  $P = 220...250$ ; твердая –  $P = 175...205$ , очень твердая –  $P = 130...160$  и особо твердая –  $P = 85...105$ ) рекомендуются в основном для применения в низкоскоростных или неподвижных соединениях, поскольку они в силу высокой вязкости плохо подтекают в зону трибоконтакта, при их использовании в узлах трения возможен разрыв смазочной пленки и могут появляться задиры на поверхности трения. Вследствие высокой вязкости смазок при введении в них наноразмерных добавок, в том числе и наночастиц алмазно-графитовой шихты, практически невозможно добиться гомогенности состава получаемой смазочной композиции. При этом в ней остаются крупные агрегаты наночастиц, оказывающие отрицательное влияние на поверхность трения по абразивному механизму изнашивания.

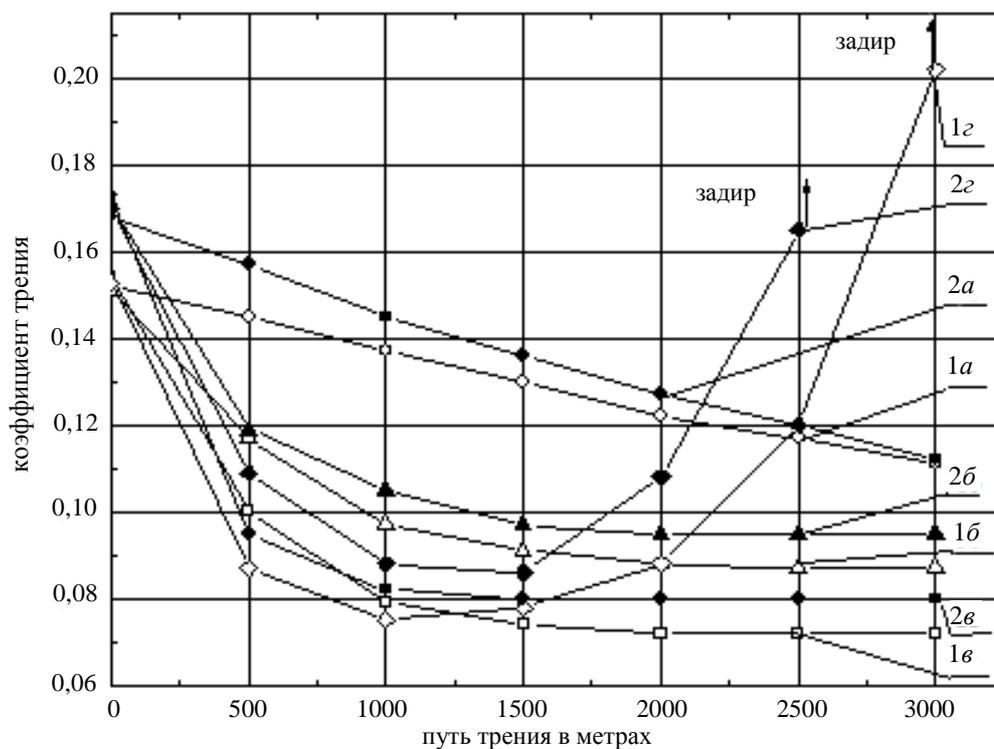
Приведенный выше анализ показывает, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы с числом пенетрации  $P = 265...340$ , что соответствует очень мягкой и мягкой консистенции.

Наноразмерные частицы добавки благодаря их высокой поверхностной энергии склонны к агрегированию, и для повышения эффективности их применения требуется проводить операции диспергирования агрегатов наночастиц. Для этих целей используют диспергирующие устройства, в основу функционирования которых положены эффекты акустической или гидродинамической кавитации. Как правило, использование подобных устройств эффективно для достижения дисперсности частиц не ниже  $d_q = 10$  нм.

В противном случае резко возрастает продолжительность обработки, требуются дополнительные операции по стабилизации гранулометрического состава диспергируемого материала, что снижает экономическую целесообразность операции диспергирования. В случае применения наночастиц алмазно-графитовой шихты размером более  $d_q = 50$  нм невозможно получить наноконпозиционную пластичную смазку с бинарной дисперсной фазой, в которой наночастицы добавки были бы закреплены (стабилизированы) в волокнах солей высокомолекулярных кислот, что предопределяет увеличенный ресурс, высокие противозадирные и противоизносные свойства, а также эффективное трибомеханическое воздействие на поверхности трения используемого смазочного материала.

Диапазон оптимальных значений концентрации наноразмерной алмазно-графитовой добавки и режимов приработки (удельная нагрузка, скорость скольжения, продолжительность) в присутствии наноконпозиционной смазки определялись на основе экспериментальных исследований.

На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента трения от продолжительности приработки (путь трения) для газотермического покрытия состава № 1 (см. табл. 1) при скорости скольжения  $V_{ск} = 0,25$  м/с и удельных нагрузках  $P = 40$  МПа (кривые 1а, 1б, 1в, 1г) и  $P = 50$  МПа (кривые 2а, 2б, 2в, 2г) с использованием пластичной смазки Литол-24 (число пенетрации 300), модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А согласно ТУ РБ 1000561180.003-2003 (размер частиц в пределах  $d_q = 10...50$  нм) с различной концентрацией добавки:  $C_{ША-А} = 0,20$  мас. % (кривые 1а, 2а);  $C_{ША-А} = 0,25$  мас. % (кривые 1б, 2б);  $C_{ША-А} = 0,50$  мас. % (кривые 1в, 2в);  $C_{ША-А} = 0,60$  мас. % (кривые 1г, 2г).



$C_{ША-А} = 0,20$  мас. % (кривые 1а, 2а);  $C_{ША-А} = 0,25$  мас. % (кривые 1б, 2б);  
 $C_{ША-А} = 0,50$  мас. % (кривые 1в, 2в),  $C_{ША-А} = 0,60$  мас. % (кривые 1г, 2г)

**Рисунок 1.** – Изменение коэффициента трения газотермического покрытия в процессе приработки в присутствии пластичной смазки Литол-24, модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А (размер частиц в пределах  $d_q = 10...50$  нм) с различной концентрацией добавки

Анализ приведенных данных показывает, что в случае использования приработочного состава с концентрацией алмазно-графитовой шихты в пределах  $C_{ША-А} = 0,25...0,50$  мас. % (кривые 1б, 1в, 2б, 2в) процесс приработки протекает достаточно интенсивно, и уже после пути трения  $L = 1000...1500$  м наступает стабилизация коэффициента трения. При использовании приработочной композиции с концентрацией алмазно-графитовой шихты  $C_{ША-А} < 0,25$  мас. % (кривые 1а, 2а) продолжительность процесса приработки рабочей поверхности газотермического покрытия чрезвычайно велика, о чем можно судить по тому, что стабилизация коэффициента трения не наступает даже после пути трения  $L = 3000$  м. Это обусловлено недостаточным содержанием в приработочном составе сверхтвердых частиц, обеспечивающих проявление эффекта трибомеханического модифицирования поверхности трения.

При концентрации алмазно-графитовой шихты в смазке  $C_{\text{ША-А}} > 0,50$  мас.% (кривые 1z, 2z) на начальной стадии происходит резкое снижение коэффициента трения, однако через некоторое время наблюдается столь же резкое его увеличение с последующим наступлением задира. Это, вероятно, связано с чрезмерно повышенной вязкостью смазочной композиции при таком содержании в ней модификатора, ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения. Наряду с этим повышенное содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции приводит к существенному увеличению стоимости последней.

В таблице 3 представлены результаты исследований влияния режимов трибомеханического модифицирования на характер изменения свойств поверхности газотермического покрытия (твердость, коэффициент трения), а также на продолжительность резкой эволюции свойств поверхностного слоя покрытия (по пути трения). Эксперименты проводились на образцах покрытий, материал которых соответствовал нумерации, приведенной в таблице 1; концентрация алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции составляла  $C_{\text{ША-А}} = 0,40$  мас.%; удельная нагрузка в зоне трибоконтакта  $p = 30 \dots 60$  МПа; скорость скольжения  $V_{\text{ск}} = 0,15 \dots 0,35$  м/с.

Таблица 3. – Влияние режимов трибомодифицирования на свойства газотермических покрытий и продолжительность приработки (маркировка образцов соответствует таблице 1)

№ опыта	№ образца	Режимы трибомодифицирования		Параметры эффективности трибомодифицирования			Примечание
		давление $p$ , МПа	скорость $V_{\text{ск}}$ , м/с	твердость $HV$ , МПа, начал./конеч.	коэффициент трения $f$ , начал./конеч.	путь трения $L$ , м	
1	1	30	0,30	3300/3700	0,16/0,12	3050	
2		40	0,30	3300/5500	0,16/0,07	1850	
3		50	0,30	3300/5600	0,17/0,08	1580	
4		60	0,30	3300/–	0,20/–	–	задир
5		50	0,15	3300/4450	0,17/0,10	2540	
6		50	0,20	3300/5550	0,17/0,07	1620	
7		50	0,35	3300/–	0,18/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ*
8	2	30	0,30	3650/4500	0,16/0,10	3100	
9		40	0,30	3650/5700	0,16/0,08	1780	
10		50	0,30	3650/5800	0,17/0,08	1610	
11		60	0,30	3650/–	0,21/–	–	задир
12		50	0,15	3650/4700	0,17/0,11	2510	
13		50	0,20	3650/5750	0,17/0,08	1670	
14		50	0,35	3650/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
15	3	30	0,30	4050/4950	0,16/0,10	3180	
16		40	0,30	4050/5900	0,16/0,08	1720	
17		50	0,30	4050/6200	0,17/0,07	1580	
18		60	0,30	4050/–	0,22/–	–	задир
19		50	0,15	4050/5550	0,17/0,11	2620	
20		50	0,20	4050/6150	0,18/0,09	1640	
21		50	0,35	4050/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
22	4	30	0,30	4200/5050	0,16/0,11	3380	
23		40	0,30	4200/6200	0,16/0,08	1800	
24		50	0,30	4200/6400	0,17/0,09	1620	
25		60	0,30	4200/–	0,23/–	–	задир
26		50	0,15	4200/5750	0,17/0,09	2850	
27		50	0,20	4200/6150	0,18/0,08	1680	
28		50	0,35	4200/–	0,20/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
29	5	30	0,30	4600/5650	0,16/0,10	3500	
30		40	0,30	4600/6500	0,16/0,07	1860	
31		50	0,30	4600/6850	0,17/0,08	1660	
32		60	0,30	4600/–	0,22/–	–	задир
33		50	0,15	4600/5950	0,17/0,10	3100	
34		50	0,20	4600/6700	0,17/0,009	1720	
35		50	0,35	4600/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ

\* ДФ ПСМ – дисперсная фаза пластичного смазочного материала.

Анализ данных, приведенных в таблице 3, показывает, что наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок  $p = 40...50$  МПа при скорости скольжения  $V_{ск} = 0,20...0,30$  м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне  $f = 0,07...0,09$  наступает после приработки на пути трения  $L = 1580...1860$  м, а твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на  $50...70\%$ . При давлениях  $p < 40$  МПа стадия приработки протекает на пути трения  $L > 3000$  м, при этом повышение твердости поверхности составляет не более  $12...23\%$ , а коэффициент трения стабилизируется на уровне  $f = 0,10...0,12$ . При давлениях  $p > 50$  МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

Скорость скольжения в меньшей степени, чем удельная нагрузка, оказывает влияние на протекание процессов модифицирования поверхности. Однако при значениях скорости скольжения  $V_{ск} < 0,20$  м/с отмечено замедленное протекание процессов приработки поверхности трения, которые завершаются после пути трения  $L > 2500$  м с фиксацией коэффициента трения на уровне  $f = 0,09...0,11$  и повышением твердости поверхности покрытия на  $28...37\%$ . В случае проведения приработки при скорости скольжения  $V_{ск} > 0,30$  м/с наблюдаются процессы разрушения дисперсной фазы пластичного смазочного материала и вытекания последнего из зоны трибоконтакта с последующим появлением задириков на поверхностях трения.

Таким образом, технология восстановления изношенных штоков должна включать процесс гиперзвуковой металлизации двумя проволоками. В качестве материала одной из проволок необходимо использовать высокохромистую сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее  $C_{Ni} = 10\%$ , в качестве другой проволоки использовать высокохромистую сталь мартенситного класса с содержанием углерода  $C_C > 0,4\%$ , причем ее диаметр в  $1,12...1,20$  раза больше диаметра проволоки аустенитного класса. После механической обработки необходимо осуществлять процесс приработки в смазочном материале, в качестве которого использовать пластичную смазку с числом пенетрации от  $\Pi = 265$  до  $\Pi = 340$ , с содержанием алмазно-графитовой шихты  $C_{ША-А} = 0,25...0,50$  мас.%, имеющей размер частиц в пределах  $d_q = 10...50$  нм. Процесс приработки необходимо осуществлять при удельной нагрузке  $p = 40...50$  МПа и скорости скольжения  $V_{ск} = 0,20...0,30$  м/с.

**Заключение.** Анализ существующих методов триботехнической обработки поверхностей трения деталей машин показал, что трибомеханическая обработка в присутствии прирабочной композиции, содержащей наноразмерные твердые добавки, относится к числу эффективных методов повышения работоспособности узлов трения. Исследование взаимосвязи между консистенцией пластичной смазки и седиментационной устойчивостью образующейся композиции при введении в смазку наноразмерной добавки показывает, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы 1 или 2-й категории пенетрации по классификации NLGI (с числом пенетрации от  $\Pi = 265$  до  $\Pi = 340$ ), что соответствует очень мягкой и мягкой консистенции. При этом содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в пластичной смазке должно быть в пределах  $C_{ША-А} = 0,25...0,50$  мас.%, а размер наночастиц должен находиться в пределах  $d_q = 10...50$  нм. Для того чтобы реализовать протекание бездиффузионного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с формированием в поверхностных слоях покрытия мартенсита деформации из образовавшегося в процессе напыления остаточного аустенита под влиянием деформационного воздействия при трибоконтакте и достигнуть минимального уровня коэффициента трения, необходимо осуществлять процесс приработки при удельной нагрузке  $p = 40...50$  МПа и скорости скольжения  $V_{ск} = 0,20...0,30$  м/с. При этом продолжительность трибомеханической обработки должна соответствовать пути трения  $L = 2000...2200$  м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Горленко, А.О. Триботехнология / А.О. Горленко, О.А. Горленко, А.С. Проскурин ; под ред. О.А. Горленко. – Брянск : БГТУ, 2006. – 188 с.
3. Кершенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.
4. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research. Vol. 1 ; Ed. : M. Jeremy Campbell. – New York : Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 1–78.
5. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса ; под ред. Д.Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1977. – 215 с.
6. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

7. Польцер, Г. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Г. Польцер, А. Фирковский // Долговечность трущихся деталей машин. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 5. – С. 85–122.
8. Лукашок, А.Н. Двухслойное нанокристаллическое покрытие для прецизионных пар трения скольжения / А.Н. Лукашок, П.В. Тихонов // Перспективные материалы ; Интерконтакт Наука. – М., 2007. – С. 294–298.
9. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А.С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 4. – Ч. 2 : Ориентационная упорядоченность поддерживающего слоя при самоорганизации в гидродинамическом режиме трения. – С. 650–658.
10. Комаров, С.Н. Металлоплакирующие смазочные материалы для пар трения сталь – сталь / С.Н. Комаров, В.Ф. Пичугин // Долговечность трущихся деталей машин. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 5. – С. 70–85.
11. Кобыльсков, И.П. Комплексные решения вопросов энергосбережения и надежности при эксплуатации машин на основе РВС-технологии / И.П. Кобыльсков // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. ОИМ НАН Беларуси, Минск, 30–31 окт. 2008 г. / ОИМ НАН Беларуси ; ред. кол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 125–128.
12. Состав для формирования новообразованного слоя на трущихся металлических поверхностях : пат. 22669798470 RU / Ю.А. Червоненко. – Оpubл. 27.12.2005.
13. Витязь, П.А. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм фрикционного разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукареко, А.И. Камко // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – Ч. 1 : Триботехнические свойства. – С. 61–68.
14. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. наука, 2011. – 527 с.
15. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. наука, 2012. – 452 с.
16. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 10. – С. 39–44.

Поступила 18.01.2017

#### SELECTING THE COMPOSITION OF THE APPLICATION COMPOSITION AND DETERMINING THE REGIMES OF TRIBOMECHANICAL PROCESSING OF STEEL GAS-THERMAL COATINGS

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

*The existing methods of tribotechnical treatment of friction surfaces of machine parts are analyzed. It has been shown that tribomechanical treatment in the presence of a run-in composition containing nano-sized solid additives is one of the most effective methods for improving the operability of friction units. It has been found that to realize the effect of tribomechanical modification of gas-thermal steel coatings with a high content of residual austenite, it is most rational to use plastic greases of the 1st or 2nd category of penetration according to the NLGI classification. The necessary content of nanoscale diamond-graphite charge in plastic grease is determined. The size limits of the nanoparticles in the process of run-in, the specific load, the sliding speed, the dependence of the duration of the tribomechanical treatment on the friction path are established.*

**Keywords:** tribotechnology, tribomechanical treatment, running-in composition, solid nano-sized additives, steel gas-thermal coatings.

УДК 621.793

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВАЛ» ПУТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛ ПОКРЫТИЯ

*канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ;*  
*канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА; В.В. КОСТРИЦКИЙ*  
*(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены трибосопряжения, работающие при высоких скоростях скольжения и больших давлениях. Проанализированы причины высокой износостойкости рабочих поверхностей и материалов в таких условиях. Разработана технология комбинированного нанесения износостойкого композиционного материала. Показана возможность получения антифрикционного материала с необходимой структурой и свойствами, не уступающего по износостойкости базовым материалам; химический состав, структуру и свойства нанесенного на рабочую поверхность композиционного материала можно варьировать в широком диапазоне, подбирая оптимальные параметры для конкретных условий. Доказывается целесообразность использования в ремонтном производстве предприятий технологии получения композиционного материала с возможностью комбинированного воздействия при нанесении.*

**Ключевые слова:** *трибосопряжения, детали типа «вал», износостойкость, рабочая поверхность, восстановление, композиционный материал.*

Основные предъявляемые к современному трибосопряжению технико-эксплуатационные требования – высокая точность геометрических параметров рабочих поверхностей, усталостная прочность и высокие показатели износостойкости.

В процессе эксплуатации автомобилей основная нагрузка приходится на детали и узлы, входящие в движительную группу автомобиля. Одним из высоконагруженных узлов двигателей внутреннего сгорания является пара «коренные и шатунные шейки коленчатого вала – вкладыши». Сегодня на предприятиях автомобильного транспорта наблюдается тенденция замены изношенного механизма новым, что приводит к повышенному расходу материальных и трудовых ресурсов и является экономически нецелесообразным, в то время как белорусские предприятия обладают мощной ремонтной базой, которая в последние годы мало востребована.

Повышение прочности сцепления и износостойкости восстановленных валов с сохранением их предела выносливости на уровне новых путем комбинированного воздействия на материал покрытия и является целью представляемой работы.

Проанализируем возможности восстановления сопряжений коленчатый вал – подшипник. В процессе эксплуатации коленчатых валов и при росте их износа наблюдается снижение сопротивления усталости на 25...30% [1], при этом степень износа коренных и шатунных шеек вала растет. Возникает вопрос их своевременного ремонта либо замены. Наиболее обоснованными способами восстановления коленчатых валов при износе и наличии трещин длиной не более 10...12 мм и глубиной до 3 мм, направленных вдоль оси вала, являются наплавка либо напыление шеек с последующей обработкой, которые позволяют получать высокую износостойкость, но при этом значительно снижается сопротивление усталости. Таким образом, получая требуемую износостойкость шеек при нанесении покрытий, необходимо сохранить усталостную прочность детали.

При исследованиях способов нанесения покрытия на подложку эффективность восстановления деталей трибосопряжения оценивают по формуле:

$$\frac{(C_{в.в.} + E \cdot K_{уд}) + (C_{в.п.} + E \cdot K_{уд})}{\frac{I_{пр.в.}}{i_{д.в.}}} \leq \frac{C_{н.в.} + C_{н.п.}}{\frac{I_{пр.н.}}{i_{д.н.}}},$$

где  $C_{в.в.}$ ,  $C_{в.п.}$  – себестоимость восстановления соответственно вала и подшипника;  $C_{н.в.}$ ,  $C_{н.п.}$  – цена соответственно нового вала и нового подшипника;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K_{уд}$  – удельные капитальные вложения на восстановление;  $I_{пр.в.}$ ,  $I_{пр.н.}$  – предельно допустимый износ соответственно восстановленной и новой детали;  $i_{д.в.}$ ,  $i_{д.н.}$  – скорость изнашивания восстановленной и новой детали.

Анализируя методы нанесения покрытий с учетом критерия эффективности восстановления детали, выявлен наиболее продуктивный и наименее затратный метод – *плазменное напыление и наплавка*.

В качестве исходных материалов для восстановления использовали покрытия эвтектоидного строения с избыточными карбидными и боридными фазами на основе стружечных отходов. Материал

покрытий должен обеспечить высокий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств сопряжения, при этом стоимость детали в целом должна быть ниже вновь изготовленной, а введение легирующих элементов повысит антифрикционные свойства, способствуя тем самым повышению остаточных напряжений.

Основные технологические приемы нанесения и анализ работоспособности материалов на аустенитной и ферритной основе подробно приведены в работах [2; 3]. В качестве легирующих применяли элементы, способные изменить физические и эксплуатационные свойства получаемых материалов [4–6].

Основной путь регулирования количества и типа карбидов в износостойких или антифрикционных сплавах – выдерживание требуемого соотношения  $Cr/C$  в сплаве. В экономнолегированных износостойких сплавах необходимое количество, тип и морфология карбидных фаз формируются за счет рационального легирования более сильными карбидообразующими элементами, такими как ванадий, титан, вольфрам и молибден. В этом случае образуются преимущественно карбиды  $M_6C$  и  $M_3C$ , способствующие повышению эксплуатационных характеристик сплавов. При этом широко известным и эффективным приемом регулирования количества, морфологии и типа карбидной фазы в хромистых износостойких сплавах является термическая обработка. С увеличением количества хрома ухудшается свариваемость и повышается вероятность образования трещин в покрытиях.

При легировании бором материала образуются высокопрочные бориды  $Me_xB_y$ , которые способствуют резкому повышению твердости сплава. Высокая микротвердость боридов (12000...37000 МПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивают значительное повышение твердости сплава. Наряду с обеспечением твердости бор в составе эвтектических структур сильно охрупчивает сплавы. Особенно сильно это проявляется при совместном легировании бором и углеродом. Повышенная активность бора при его избытке выше предела растворимости приводит к образованию карбидов и боридов в наплавленном слое, то есть к упрочнению стали. Также он оказывает раскисляющее воздействие, а при его значительном количестве образуются трещины.

Большинство наплавочных сплавов содержит углерод. Широкое применение углерода обусловлено его малой стоимостью и высоким упрочняющим воздействием. При доэвтектическом содержании углерода ( $< 0,8\%$ ) формируется покрытие, обладающее высокой ударной прочностью при сравнительно высокой износостойкости. При большем содержании углерода и наличии карбидообразующих металлов существенно возрастает износостойкость, особенно абразивная, однако стойкость к ударным нагрузкам снижается. Углерод резко снижает коррозионную стойкость покрытий. Содержание углерода более  $1,2\%$  применяется редко. На технологические свойства сплавов углерод оказывает отрицательное воздействие – ухудшает свариваемость и увеличивает склонность к трещинообразованию.

Для повышения прочности материала и его антифрикционных свойств рекомендуют легирование композиционного материала медью. При этом приводятся различные значения содержания меди: от  $0,5$  до  $30\%$  для получения наилучших характеристик антифрикционных свойств. При таком легировании материалы способны работать при статических режимах с нагрузками, равными  $280$  МПа, однако величина « $p \cdot v$ » для этих материалов не превышает  $2$  МПа·м/с. Известно, что избыточное количество меди концентрируется во вторичной фазе, располагающейся в основном вдоль границ зерен. Сравнительный анализ влияния меди на структурообразование и свойства порошковых композиционных материалов свидетельствует о том, что в порошковых композиционных материалах не происходит полного расплавления меди, графитизирующее и упрочняющее ее влияние минимально, также не наблюдается аустенитно-стабилизирующий эффект. Следовательно, в данном случае речь может идти преимущественно о повышении антифрикционных свойств материала и его демпфирующих свойств в композиции.

Материал покрытий должен обеспечивать повышение усталостной прочности детали. Наличие легирующих элементов значительно повышает остаточные напряжения, а присутствие в покрытии карбидов является дополнительным источником для возникновения усталостных трещин. Наплавка порошковыми материалами с введенными легирующими элементами позволяет повысить твердость наплавленного покрытия до HRC 45...50 и получить гетерогенную структуру «матрица + твердые включения», оптимальную с точки зрения обеспечения износостойкости. При этом на всех этапах получения материала ведется его формирование за счет интенсивного механического воздействия. От этапа получения порошковой шихты (введение определенного количества легирующих элементов) до этапа получения материала (получение нужной для этих режимов работы структуры и распределение элементов в соответствии с проектом).

При нанесении материала в зонах, нагреваемых до температуры выше фазовых превращений, и при условии ускоренного охлаждения протекают следующие процессы:

- образование неравновесных структур, таких как пересыщенные углеродом и легирующими элементами твердые растворы;
- увеличение размеров зерна, которое оказывает неоднозначное влияние на эксплуатационные свойства валов, и, как следствие, возникновение внутренних остаточных напряжений.

Вышеперечисленные процессы в различной степени влияют на микроструктуру покрытия, а следовательно и на усталостную прочность детали в зависимости от материала покрытия. При этом неравновесные метастабильные структуры покрытий, с одной стороны, обеспечивают высокую твердость, а также прочность и износостойкость; с другой – увеличенные размеры зерна и внутренние остаточные растягивающие напряжения снижают сопротивление циклическим нагрузкам. Поэтому необходимо усилить процессы, которые стремятся свести это влияние к минимуму, обеспечив тем самым высокий уровень эксплуатационных свойств покрытия, в частности путем проведения следующих мероприятий [7; 8]:

1) введение в металл покрытия легирующих элементов, способствующих образованию высоко-температурных избыточных фаз типа твердого раствора, низкотемпературных эвтектик, первичных карбидов, боридов и др.;

2) введение в ванну при наплавке модификаторов тугоплавких металлов или соединений;

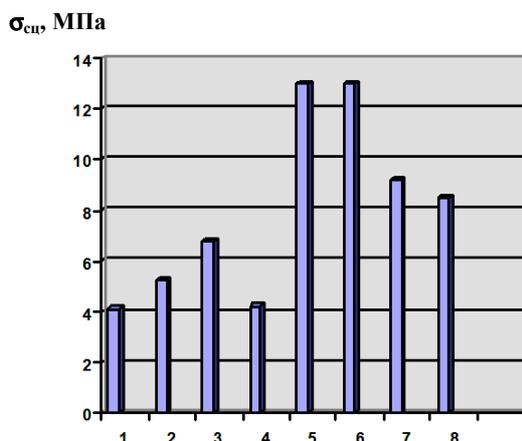
3) температурное воздействие с целью выравнивания внутренней структуры и нивелировки остаточных напряжений;

4) воздействие на ванну жидкого металла ультразвуковых или механических вибраций.

Решению первых трех проблем посвящены публикации [9; 10]. Подход к третьей проблеме решается в основном воздействием на температурное поле путем уменьшения градиента температур, что приводит к выравниванию внутренней структуры. Часть исследователей склонна уделять внимание измельчению структуры материала в момент кристаллизации за счет создания новых центров кристаллизации.

Представляется целесообразным приложить механические воздействия как во время первичной кристаллизации сварочной ванны, так и на этапе вторичной кристаллизации. Причем была выдвинута гипотеза о том, что длина волны воздействия должна укладываться в линейный объем сварочной ванны жидкого металла.

Для оценки влияния технологических факторов была исследована прочность сцепления (штифтовая проба)  $\sigma_{сц}$  покрытий (МПа) из вышеуказанных материалов. При этом варьировались сила тока  $I$  и дистанция напыления  $L$  (рис. 1).



- 1 – Сталь 08X13 : I = 200 А, L = 95 мм; 2 – Сталь 08X13 + ЛЭ : I = 200 А, L = 95 мм;  
 3 – СЧ + ЛЭ : I = 200 А, L = 95 мм; 4 – ИЧХ + ЛЭ : I = 200 А, L = 130 мм;  
 5 – Сталь 08X13 + ЛЭ : I = 300 А, L = 95 мм; 6 – СЧ + ЛЭ : I = 300 А, L = 95 мм;  
 7 – Сталь 08X13 + ЛЭ + механическое воздействие : I = 200 А, L = 95 мм;  
 8 – СЧ + ЛЭ + механическое воздействие : I = 200 А, L = 95 мм

**Рисунок 1. – Прочность сцепления покрытий из исследуемых гетерогенных материалов при плазменном нанесении**

При отработке различных технологических приемов выявлено следующее:

- при наплавлении с оплавлением по обмазке – адгезия уменьшается (материалы 1 и 2). Вероятно, частицы обмазки под воздействием дутья горелки и кавитационных процессов перемещаются ближе к подложке, что и снижает сцепление нанесенных материалов;

- при наплавке порошковой смеси без оплавления – адгезия увеличивается, однако растет сегрегация наплавленного материала. Это в меньшей степени, но оказывает негативное влияние на прочность сцепления (материал 3 и 4);

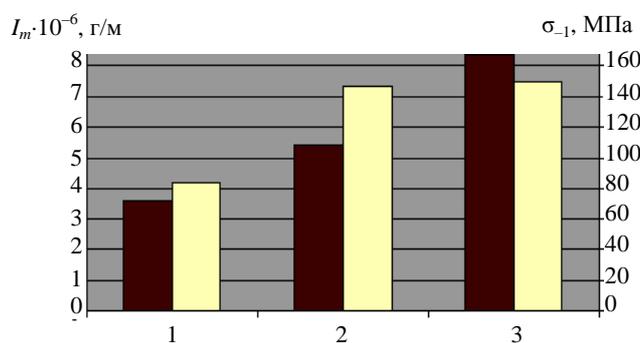
- при наплавке с уменьшением расстояния, но увеличением силы тока, а следовательно и температуры ванны – хорошая адгезия, незначительное выгорание легирующих элементов, сегрегация прак-

тически отсутствует. Очевидно, малое рассеивание материала и большой нагрев способствуют приближению покрытия к оптимуму (материалы 5 и 6);

- при механическом воздействии на жидкую фазу как в период твердения, так и сразу после кристаллизации наблюдается увеличение прочности сцепления, что объясняется более компактным распределением нерасплавившихся либо частично расплавившихся частиц и более полным их смачиванием жидкой фазой (материал 7 и 8).

Таким образом, максимальную прочность сцепления покрытия с подложкой обеспечивают сила тока  $I = 200$  А, расстояние до сопла горелки  $L = 95$  мм (материалы 5 и 6).

Сопоставительный анализ рассматриваемых материалов на износостойкость и усталостную прочность (рис. 2) показал, что образцы с покрытиями из стружечных отходов чугуна с добавлением легирующих элементов при высокой износостойкости имеют низкую усталостную прочность. Это можно объяснить наличием большого количества карбидных и боридных высокотвердых составляющих, равномерно распределенных по объему покрытия, вызывая тем самым большие остаточные напряжения и повышенную хрупкость.



1 – СЧ + ЛЭ; 2 – 08X13 + механическое воздействие; 3 – 08X13

Рисунок 2. – Интенсивность изнашивания  $I_m$  (темные столбцы) и предел выносливости  $\sigma_{-1}$  (светлые столбцы) наплавленных образцов

Применение механического воздействия на этапе кристаллизации материала связано с интенсивностью изнашивания, резко снижающейся при практически одинаковом пределе выносливости материала. Это можно объяснить следующим: при комбинировании наплавки и механического воздействия определяющими являются процессы, происходящие при кристаллизации расплавленного металла. Механические воздействия, осуществляемые в момент начала кристаллизации металла, создают: условия для протекания нелинейных эффектов в процессе кристаллизации; различные акустические потоки; точечное гравитационное воздействие; кавитационные процессы; силы вязкого трения. Комплексное воздействие приводит к изменениям структуры: уменьшению величины зерна; образованию равновесной структуры; повышению однородности наплавленного материала; уменьшению степени ликвации материала; более равномерному распределению неметаллических включений по всему объему наплавки. Характер образующейся структуры определяется такими факторами, как интенсивность перемешивания и коэффициент диффузии примесей в металле, скорость кристаллизации, градиент температур, степень переохлаждения и др. Изменяя эти параметры, наряду с изменением частоты механического воздействия можно получить желаемую равновесную структуру.

При этом в результате механического воздействия снижаются остаточные напряжения в зоне наплавки и формируется однородная мелкозернистая структура металла. Это объясняется появлением большого числа центров кристаллизации. Так, установлено, что при введении в материал хрома интенсивность изнашивания увеличивается в 4,63 раза, а предел выносливости – в 3,54 раза. Однако при механическом воздействии на материал в период твердения интенсивность изнашивания увеличивается в 3,02 раза (36,5%), а предел выносливости изменяется незначительно, увеличивается в 1,01 раза (1,4%).

#### Выводы:

1. При исследовании технологических параметров процесса плазменного формообразования установлены наилучшие режимы нанесения для достижения максимальной прочности сцепления, минимального износа и соотносительного предела выносливости изучаемых материалов. Так наилучшими с точки зрения прочности сцепления является дистанция 95 мм при силе тока 300 А. При этих же параметрах интенсивность изнашивания ниже, а предел выносливости выше у материалов, подвергавшихся механическому воздействию на этапе первичной и вторичной кристаллизации.

2. Экспериментально установлена возможность регулирования свойств нанесенного материала: количеством введенных легирующих элементов, технологическими режимами плазменного формообразования, механическим воздействием на покрытие в процессе кристаллизации. Так, установлено, что при механическом воздействии на жидкую фазу и при вторичной кристаллизации материала интенсивность изнашивания снижается на 36,5%, а предел выносливости – на 1,4%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вигерина, Т.В. Технологии восстановления коленчатых валов двигателей из высокопрочного чугуна и конструкционной стали напылением, наплавкой и поверхностным пластическим деформированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Т.В. Вигерина ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2013. – 25 с.
2. Камынин, В.В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных пар трения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В.В. Камынин ; Брянская инженерно-техническая акад. – Курск, 2000. – 19 с.
3. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
4. Морозов, С.В. Повышение износостойкости и долговечности литых деталей и инструмента за счет использования новых легированных Fe-C сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С.В. Морозов ; Брянская инженерно-техническая акад. – Брянск, 2003. – 15 с.
5. Пашечко, М.И. Разработка износостойких эвтектических покрытий большой толщины на основе системы Fe – Mn – C – В : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / М.И. Пашечко ; Физ.-мех. ин-т им. Г.В. Карпенко. – Львов, 1985. – 25 с.
6. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
7. Trofimov, A.I. The ultrasonic technique of increasing the strength characteristics of the welded joints of metal structures [Электронный ресурс] / A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov. – Режим доступа: [http://raen.info/files/3527/Pages%20from%20maket\\_2011\\_1\\_03-08.pdf](http://raen.info/files/3527/Pages%20from%20maket_2011_1_03-08.pdf).
8. Кузьмин, Ю.А. Электродуговая сварка в ультразвуковом поле [Электронный ресурс] / Ю.А. Кузьмин, В.В. Щавлев ; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Режим доступа: [http://scjournal.ru/articles/issn\\_1993-5552\\_2008\\_7\\_37.pdf](http://scjournal.ru/articles/issn_1993-5552_2008_7_37.pdf).
9. Спиридонова, И.М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов / И.М. Спиридонова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1984. – № 2. – С. 12–16.
10. Швец, Т.М. Фазовый состав и структура высокодисперсных порошков железа и его композиций с платиной, серебром, золотом, медью и цинком / Т.М. Швец, Н.О. Кущевская, А.Е. Перекокс // *Порошковая металлургия*. – 2003. – № 1. – С. 28–35.

Поступила 01.02.2017

#### RESTORATION OF TYPE “SHAFT” PARTS BY THE COMBINED EFFECTS OF THE COATING MATERIAL

V. FRUCKI, T. VIGERINA, V. KOSTRITSKI

*The tribocoupling working at high speeds of sliding and big pressure are considered. The reasons of high wear resistance of working surfaces and materials in such conditions are analysed. The technology of the combined putting wearproof composite material is developed. The possibility of receipt of antifrictional material, with necessary structure and properties, not yielding on wear resistance to basic materials is shown. The chemical composition, structure and properties of the composite material applied on a working surface can be varied in a broad range, selecting optimum parameters for specific conditions. Feasibility of use in repair production of the entities of technology of receipt of composite material with a possibility of the combined impact when drawing is proved.*

**Keywords:** units, parts of type “shaft”, wear resistance, surface restoration, the composite material.

УДК 621.793

## ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

*д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ;*  
*канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ; Д.И. ТРУСОВ*  
*(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);*  
*А.П. ЯЛОВИК*  
*(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);*  
*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН*  
*(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается использование композиционных порошковых проволок в процессах электродуговой металлизации. Показана необходимость учитывать при этом размер износостойкого наполнителя. Установлена зависимость между скоростью струи распыляющих газов и размером частиц наполнителя, благодаря которой обеспечиваются максимальные значения твердости наносимых покрытий. Предложена технология металлизации износостойких композиционных покрытий толщиной более 0,8 мм послойным напылением монолитных и композиционных проволок. Установлено, что износостойкость металлизационных покрытий, напыленных композиционными порошковыми проволоками, превышает износостойкость гальванического хромового покрытия.*

**Ключевые слова:** электродуговая металлизация, гиперзвуковая металлизация, порошковые проволоки, твердость и износостойкость покрытий.

**Введение.** Технологии, основанные на нагреве и распылении проволок, хорошо зарекомендовали себя при восстановлении, упрочнении и защите от коррозии и изнашивания деталей общемашиностроительного профиля. Как показала практика, наиболее экономичными и эффективными методами проволоочного газотермического напыления являются традиционная электродуговая металлизация (ЭДМ) и гиперзвуковая металлизация (ГМ) [1; 2]. Последняя отличается высокими динамическими параметрами распыляющего потока (скорость до 1500 м/с), что и обусловило название процесса [2].

Использование композиционных порошковых проволок взамен монолитных как электродных материалов для газотермического напыления позволило широко варьировать химический состав покрытий, расширить область их использования, а также во многих случаях получить покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и сверхзвуковых газотермических покрытий, но в 5...10 раз дешевле.

Покрытия из порошковых проволок используют во многих отраслях техники для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного изнашивания при комнатной и повышенных температурах до 700 °С, для ремонта различных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях граничного трения [3–8].

Основными производителями композиционных порошковых проволок в мире являются следующие компании: Sulzer Metco (США), Powder Alloy Corporation (США), Praxair Surface Technologies (США), TAFA (США), Boeing (США), Durum (ФРГ), Kanthal (Швеция). Каждая из приведенных компаний производит достаточно широкую гамму композиционных проволок, хотя необходимо отметить, что многие марки близки по составу. Порошковые проволоочные материалы выше по стоимости, чем проволоки из высоколегированных сталей, но обладают более высокой твердостью и эксплуатационными свойствами (табл. 1).

Таблица 1. – Технические характеристики некоторых выпускаемых в Российской Федерации стальных проволоочных материалов

Марка проволоки	Химический состав	Назначение	Твердость покрытия после напыления, HV
Св08	C – 0,08...0,1%	Сварка низкоуглеродистых сталей, ЭДМ	250...300
Св 08Г2С	C – 0,08...0,1%, Mn – 1,5...2,0%, Si – 0,8...1,2%		250...300
Нп 40	C – 0,37...0,42%	ЭДМ, износостойкая наплавка	300...350
Нп 60	C – 0,57...0,62%		350...400
65Г	C – 0,63...0,68%, Mn – 0,8...1,2%,		350...400
ПП-ТП1 (порошковая)	C – 0,67%, Cr – 3,58%, Ni – 2,33%, Si – 0,27%, Mn – 0,42%, Al – 2,08%	ЭДМ и наплавка деталей трибосопряжений	400...450
НП-4 (порошковая)	Система легирования Fe – C – B – Cr		400...450

Преимущества порошковых проволок обуславливаются не только гетерогенной структурой покрытия после напыления, но и активным взаимодействием компонентов порошковой шихты друг с другом при напылении и с подложкой, что способствует повышению температуры частиц, раскислению оксидов на поверхности подложки и, как следствие, повышению адгезии покрытия к подложке.

Выпускаемые композиционные порошковые проволоки представляют собой, как правило, стальную или никелевую оболочку, заполненную порошковой шихтой (рис. 1).

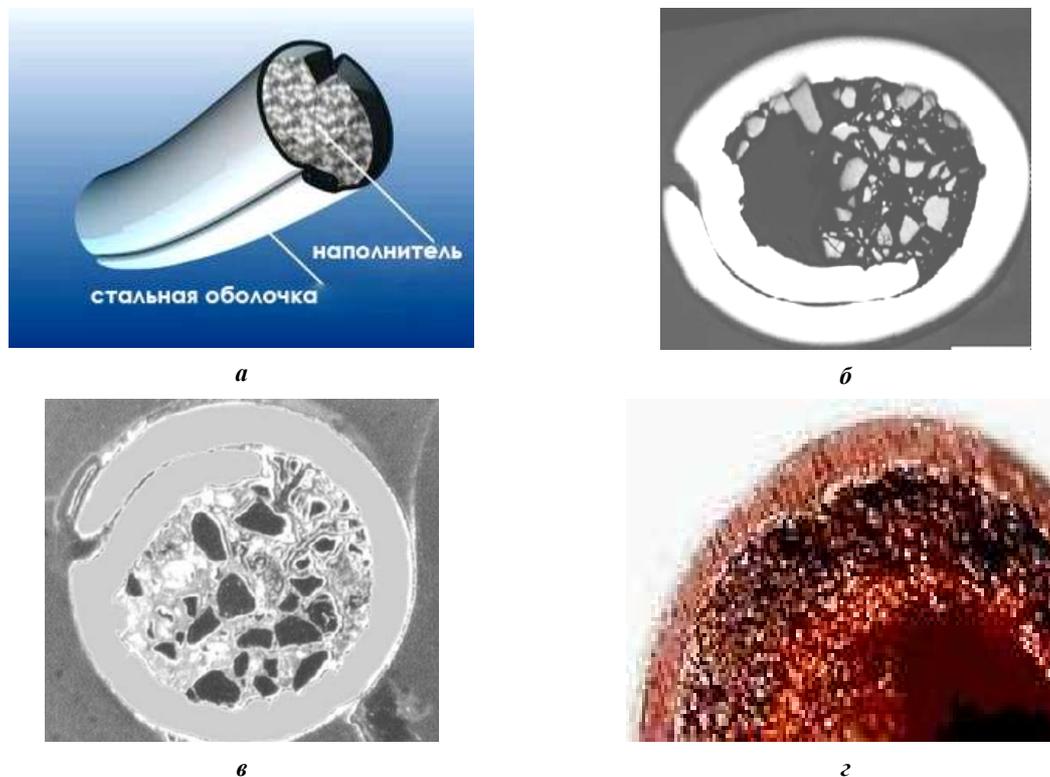


Рисунок 1. – Схема устройства порошковой проволоки (а) и поперечное сечение композиционных проволок, выпускаемых фирмами «Durum» (б), «Sulzer Metco» (в), «Praxair Surface Technologies» (г)

Исследование особенностей процесса восстановления деталей гиперзвуковой и традиционной электродуговой металлизацией при использовании порошковых проволок в качестве распыляемых электродов и явилось целью данной работы.

**Оборудование и методики исследований.** Использовали четыре типа металлизаторов, каждому из которых соответствовали свои значения скорости распыляющей струи. Традиционная электрометаллизация осуществлялась на установке ЭМ-14 при расходах воздуха около  $36..43 \text{ м}^3/\text{ч}$  и давлении  $0,40..0,54 \text{ МПа}$ , что обеспечило скорость распыляющей воздушной струи от 80 до 150 м/с. Увеличение давления воздуха до  $0,65 \text{ МПа}$  и расхода до  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  на металлизаторе модели ЭМ-12 позволило повысить скорость воздушной струи до 320 м/с. Активированная электродуговая металлизация (АДМ) на установке АДМ-6, оснащенной камерой сгорания пропано-воздушной смеси с соплом Лавалья, обеспечила скорость распыляющей струи от 500 до 850 м/с. Гиперзвуковой металлизатор АДМ-10 конструкции ОИМ (Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) позволил распылять струей, летящей со скоростью до 1500 м/с.

Для нанесения покрытий использовали порошковые проволоки с характеристиками, приведенными в таблице 2. Покрытия наносили на цилиндрические и плоские образцы из стали 20. Перед восстановлением рабочая поверхность образцов и пластин подготавливалась струйно-абразивным методом.

Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа Axiovent 200 MAT и сканирующего электронного микроскопа JSM-840.

Фазовый состав покрытий определяли на дифрактометре ДРОН-3.0 (монохроматизированное  $\text{CoK}_{\alpha}$  излучение,  $V = 30 \text{ кВ}$ ,  $I = 10 \text{ mA}$ ), твердость – по методу Виккерса на твердомере ТП, микротвердость измерялась на микротвердомере НХ 1000ТМ при нагрузках  $0,2..1,0 \text{ Н}$ .

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями осуществлялись на машине трения МТВП-9М по схеме возвратно-поступательного перемещения.

Таблица 2. – Характеристики используемых проволок

Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм	Наполнители	Размер частиц наполнителей, мкм
ПП-Нп-ПСТ 350Т ЗАО «Спецсплав», Украина	1,6...1,8	WC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , TiC	120...350
DURMAT AS-815 «DURUM», Германия	1,62	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> C, SiC	40...100
ПП-ПМ-6 ООО «Северстальметиз», Россия	1,8	WC, B <sub>4</sub> C	100...250
ПП-Нп-19ГСТ ООО «Северстальметиз», Россия	1,6...1,8	WC, карбоборид хрома	80...160
DURMAT AS-897 «DURUM», Германия	1,62	WC, SiC, TiC	40...60
Sulzer Metco 8297 «Sulzer Metco Inc.», США	1,62	WC, SiC, TiC	45...60
ПП-ОИМ-ГМ ЗАО «Спецсплав», Украина по заказу ОИМ	1,8	SiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5...20

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ полученных результатов показывает, что если для наплавки размер наполнителя практически не оказывает влияния на его содержание в конечном продукте – покрытии, то при электрометаллизации этот параметр играет важную роль. Чем больше скорость перемещения частиц наполнителя из зоны дуги и скорость их движения в струе, тем меньше степень их прогрева и тем больше вероятность отскока от упрочняемой поверхности детали, что снижает коэффициент использования материала, а соответственно и интегральную твердость, и износостойкость покрытий. Коэффициент использования материала наполнителя – это отношение количества наполнителя в покрытии к количеству наполнителя в проволоке, характеризует степень перехода наполнителя из напыляемого материала в покрытие. Это подтверждается и измерениями твердости покрытий, в результате которых установлено, что покрытия, сформированные распылением проволок ПП-Нп-ПСТ 350Т (материал предназначен для наплавки) всеми использованными установками, не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями. Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Изучение шлифов поперечных сечений проволок показало, что размеры частиц твердых включений в шихте составляют более 250 мкм, а толщина оболочки – около 350 мкм.

Исследования, проведенные с проволоками, имеющими наполнитель различных размеров, подтвердили предположение, что при высокой скорости эвакуации из зоны дуги столь крупные частицы не успевают прогреться и не участвуют в процессе формирования покрытия, образуя практически только из материала оболочки (рис. 2).

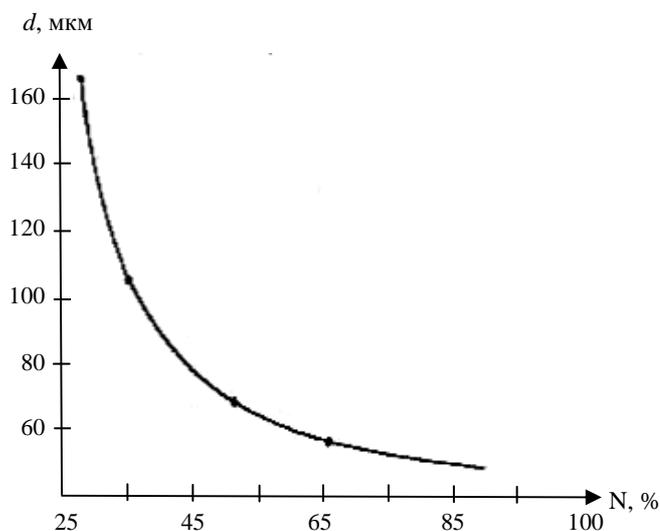


Рисунок 2. – Связь между количеством порошкового наполнителя, попадающего в напыляемое покрытие и средним размером его частиц

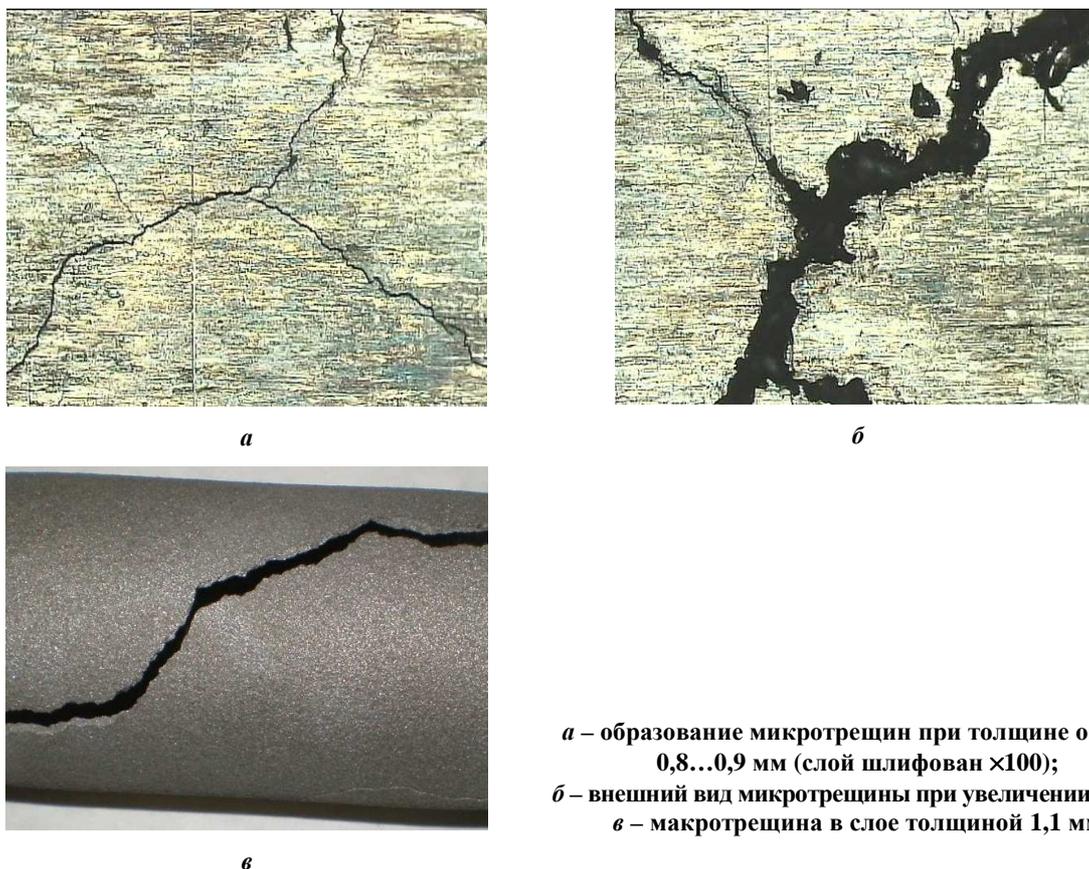
Для того чтобы обеспечить достаточно высокое содержание наполнителя в покрытии, необходимо выбирать скорость движения распыляющей струи в зависимости от максимального размера частиц наполнителя в порошковой проволоке. Установлено определенное соотношение между этими параметрами, которое можно представить в виде следующего выражения:

$$V \leq A \cdot e^{-0,02d},$$

где  $V$  – скорость газовой струи (м/с);  $A$  – коэффициент, численно равный 1470 (м/с);  $e$  – основание натурального логарифма;  $d$  – величина, численно равная максимальному диаметру в микронах частиц износостойкого наполнителя.

Анализ полученных данных свидетельствует, что порошковый наполнитель в композиционной проволоке, распыляемой гиперзвуковой металллизацией, должен иметь размеры не более 50 мкм.

Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что материалы с большим количеством износостойкого наполнителя, в частности Sulzer Metco 8297, весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, практически не удавалось получить из материала Sulzer Metco 8297, а затем и из DURMAT AS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины; после напыления слоя 1 мм они увеличивались в размерах, а при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось (рис. 3). Заметим, что материал DURMAT AS-815 позволяет получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать теплонагруженность образца.

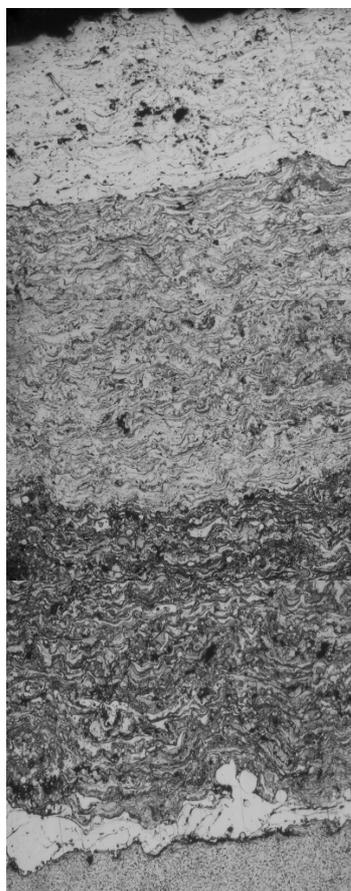


**а** – образование микротрещин при толщине около 0,8...0,9 мм (слой шлифован  $\times 100$ );  
**б** – внешний вид микротрещины при увеличении  $\times 200$ ;  
**в** – макротрещина в слое толщиной 1,1 мм

**Рисунок 3. – Рост трещины в покрытии, полученном напылением материалов Sulzer Metco 8297 и DURMAT AS-897**

Для восстановления-упрочнения деталей с износом рабочих поверхностей более 0,5 мм предложена следующая технология. На подготовленную поверхность детали наносится подслой распылением проволоки из нихрома типа X20H80, обеспечивающий достаточную прочность сцепления покрытия с основой. Толщина подслоя, как правило, не превышает 150 мкм. На поверхность подслоя наносят слой 0,20...0,35 мм распылением проволоки из стали мартенситного класса, позволяющей создать в слое закалочные структуры. Затем наносят слой напылением композиционной порошковой проволоки, обеспечи-

вающей требуемую износостойкость и коррозионную стойкость покрытия (рис. 4). Такая комбинация слоев помимо экономической выгоды (снижается общая стоимость покрытия) обуславливает возможность эксплуатации покрытия в условиях абразивного изнашивания при ударных нагрузках.



Слой Sulzer Metco 8297

Слой из стали 40X13

Слой из порошковой проволоки  
30X20NM

Подслой из X20H80

Основа

**Рисунок 4. – Микроструктура многослойного покрытия**

Анализ микроструктуры свидетельствует о следующем:

- в верхнем слое из Sulzer Metco 8297 трещины отсутствуют;
- плотность напыленных слоев из стали 40X13 и из порошковой проволоки 30X20NM близка к плотности компактного материала;

- в слое Sulzer Metco 8297 присутствуют включения и поры, которые визуальнo трудно различить. Как правило, в газотермических покрытиях редко встречаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Результаты проведенных исследований микротвердости напыленных слоев из материала AS-897 и Sulzer Metco 8297, представленные на рисунках 5а, б, показали:

- первый слой толщиной 100...120 мкм из AS-897, напыленный на подслои из X20H80, имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 7000...8000 МПа. В переводе в единицы HRC (Роквелл, шкала С) это составляет 59...62 HRC;

- последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

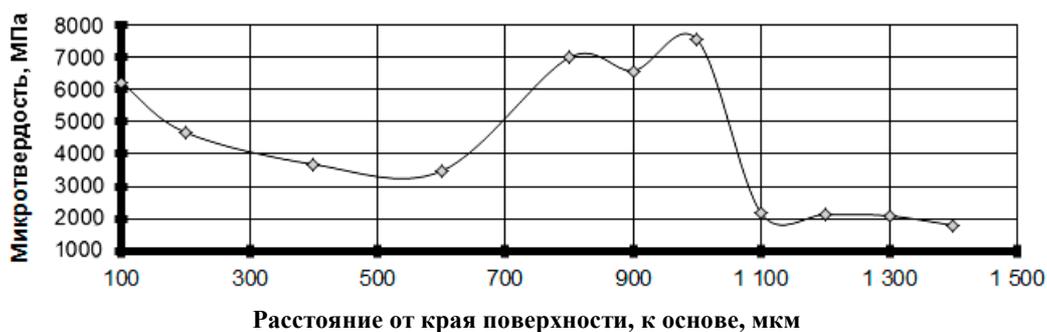
Результаты первых экспериментов по механической обработке покрытий показали, что для шлифования покрытий из высокотвердых материалов Durum и Sulzer Metco необходимо выбирать конкретные для каждого из них специфические режимы и типы шлифовальных кругов. После использования абразивных кругов из электрокорунда для шлифования литых сталей на поверхности покрытия появились мелкие впадины, похожие на поры (рис. 6, б). Особенно это характерно для материала DURMAT AS-897. После более тщательного анализа дефектов установлено, что впадины не являются порами, а представляют собой

пустоты, оставленные выкрашивающимися при шлифовании частицами карбидов, входящими в состав распыляемого материала.

В связи с отсутствием необходимых шлифовальных кругов дальнейшая обработка производилась вручную с помощью шлифовальных шкурок. Ручная обработка позволила получить поверхность без подобных дефектов. Для заполнения мелких впадин можно также рекомендовать метод деформационного плакирования, который хорошо зарекомендовал себя при обработке покрытий с поверхностными порами диаметром до 100 мкм [9].



а



б

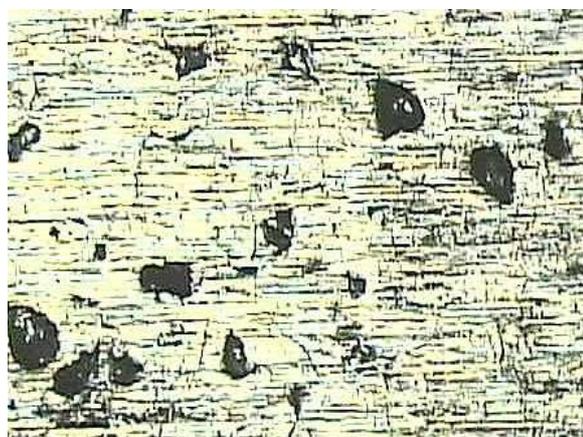
а – покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм),  
 слой DURMAT AS-897 ( $\approx 600$  мкм), слой смеси AS-897 + 40X13 ( $\approx 900$  мкм);

б – покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм) и последующий слой DURMAT AS-897

Рисунок 5. – Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала DURMAT AS-897



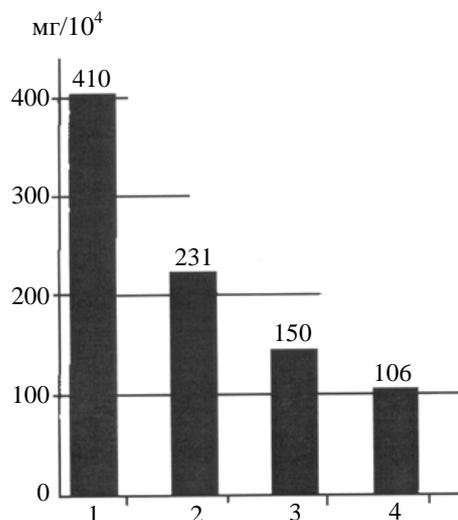
а



б

Рисунок 6. – Внешний вид напыленного покрытия (а)  
 и поверхность после шлифования (б)  $\times 200$

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями в режиме трения скольжения в 12%-ном растворе соляной кислоты, содержащем частицы двуоксида кремния, показали (рис. 7), что износостойкость гальванического хромового покрытия уступает напыленным покрытиям из материалов DURMAT AS-815 и Sulzer Metco 8297.



1 – ГМ-покрытие из стали 40X13;  
2 – гальваническое хромовое покрытие;  
3 – ГМ-покрытие AS-815; 4 – покрытие Sulzer Metco 8297

Рисунок 7. – Интенсивность изнашивания (мг за 10<sup>4</sup> циклов) покрытий

Изучение микрошлифа с разрушенным гальваническим покрытием показало, что под покрытием твердого хрома развивается пластическая деформация на глубине 100...150 мкм, которая и вызывает его разрушение.

В работах [10; 11] Института физики прочности и материаловедения СО РАН, отмечалось, что при больших удельных нагрузках гальванические хромовые покрытия, нанесенные на детали узлов трения скольжения, изнашиваются и разрушаются интенсивно. Например, при исследовании отработанных штоков виброгасителей железнодорожных вагонов, при изготовлении которых на полированную стальную поверхность электролитическим методом наносили хромовое покрытие толщиной около 25...40 мкм, покрытия изнашивались до истечения гарантийного срока службы детали.

Предположительно, причиной этого является разрушение покрытия вследствие пластической деформации подложки, которая значительно выше, чем деформация покрытия.

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) установлено, что порошковые проволоки (произведенные в России и Украине), предназначенные для процессов электродуговой наплавки, при распылении методами традиционной электродуговой металлизации и гиперзвуковой металлизации не обеспечивают твердость в напыленных покрытиях более чем 32 HRC. Это явление обусловлено быстрой эвакуацией крупных частиц наполнителя из зоны дуги;

2) установлена зависимость количества частиц порошкового наполнителя композиционных проволок, попадающих в покрытие при металлизации, от их размера. Для обеспечения высокого содержания наполнителя в покрытии необходимо выбирать скорость движения распыляющей струи в зависимости от максимального размера частиц наполнителя в порошковой проволоке. Показано, что при гиперзвуковой металлизации необходимо использовать порошковые проволоки с размерами частиц наполнителя менее 50 мкм;

3) при гиперзвуковой металлизации композиционных проволок, содержащих большое количество неметаллических наполнителей (карбидов, карборидов), необходимо за один проход наносить слои толщиной не более 100...120 мкм и охлаждать их после каждого прохода до комнатной температуры. Для формирования покрытий толщиной более 0,8 мм необходимо наносить многослойное по-

крытие, у которого нижележащие слои наносятся стальными проволоками, а верхний слой, полученный распылением композиционной проволоки, должен иметь толщину не более 0,5 мм;

4) износостойкость покрытий, напыленных материалами Sulzer Metco 8297, DURMAT AS-815 и DURMAT AS-897, превышает износостойкость гальванического хромового покрытия в 1,5...2,1 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17–23.
2. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36–42.
3. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires / A. Pokhmurskaya [et al.] // Surface & Coating Technology. – 2002. – 151–152. – P. 490–194.
4. Triboelektroche miczne wtasciwosci powlok natryskiwan-nych lukowo na stopy aluminium / V. Pokhmurskii [et al.] // Inzynieria Powierzchni. – 2008. – № 1. – S. 9–13.
5. Високотемпературна корозія електродугових покриттів з порошкових дротів на базі системи Fe–Cr–B–Al / М. Студент [та інш.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 93–97.
6. Похмурский, В.И. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напыления покрытий (Обзор) / В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.М. Гвоздецкий // Автоматическая сварка. – 2011. – № 9. – С. 18–21.
7. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий из порошковых проволок / Г.Г. Винокуров [и др.] // Вестн. ЯГУ. – 2005. – Т. 2, № 3. – С. 57–60.
8. Винокуров, Г.Г. Разработка и применение порошковых проволок для газопламенного напыления / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 6. – С. 36–37.
9. Белоцерковский, М.А. Модифицирование поверхности газотермических покрытий из коррозионно-стойких сталей деформационным плакированием / М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич, Е.Ф. Коновалова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1. – С. 64–67.
10. Панин, В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
11. Клименов, В.А. Исследование характеристик деформации на мезомасштабном уровне и разрушения композитов «газотермическое покрытие» – основа при растяжении / В.А. Клименов, С.В. Панин, В.П. Безбородов // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С. 141–156.

Поступила 24.01.2017

#### PECULIARITIES OF RESTORING DETAILS BY METHODS OF METALIZATION USING COMPOSITE POWDER WIRE

**M. BELOTSEKOVSKY, A. SOSNOVSKY, D. TRUSOV,  
A. YALOVIK, A. DUDAN**

*The use of composite powder wires in the processes of electric arc metallization is considered. It is shown that it is necessary to take into account the size of the wear-resistant filler. A relationship between the velocity of the jet of atomizing gases and the size of the filler particles is established, due to which the maximum hardness values of the applied coatings are provided. The technology of metallization of wear-resistant composite coatings with a thickness of more than 0.8 mm by layer-by-layer deposition of monolithic and composite wires is proposed. It is established that the wear resistance of metallization coatings sprayed with composite powder wires exceeds the wear resistance of the galvanic chrome coating.*

**Keywords:** electric arc metallization, hypersonic metallization, powder wires, hardness and wear resistance of coatings.

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОХРАНА ТРУДА

УДК 681.785.554

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦВЕТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ*  
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);  
*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматривается проблема идентификации древесины с использованием программно-аппаратных средств. Анализируются основные способы идентификации: органолептические методы и методы, связанные с определением прочностных свойств исследуемых объектов. В качестве решения проблемы классификации древесных пород предложено использовать классические цветометрические модели RGB, СМУК, Lab и HSB, которые характеризуют породу древесины тем или иным набором параметров. Для повышения точности классификации параметры цветowych моделей дополнены параметром, учитывающим количество цветов в изучаемых объектах. Установлено, что из всех цветометрических систем наиболее эффективной является система СМУК, затем следуют системы RGB, Lab, HSB. Показано, что величина верно классифицированных объектов зависит от принятой цветометрической модели.*

**Ключевые слова:** *идентификация, породы древесины, методы распознавания, цветометрические модели.*

**Введение.** Несанкционированные рубки ценных пород деревьев наносят значительный вред, связанный как с вопросами контрабанды древесины ценных пород, так и с вопросами ущерба лесной флоре и фауне. Среди различных способов нарушений законодательства при провозе через таможенную границу и иные пункты контроля и досмотра не последнее место занимает фальсификация породного состава древесины. Вместе с тем вопрос идентификации древесины до сих пор остается недостаточно изученным. Имеется крайне малое число работ, затрагивающих рассматриваемую проблему.

Деревья, произрастающие в разных климатических условиях, естественно, получают разное почвенное питание, выращены из посадочного материала, полученного по разным технологиям, следовательно, древесина имеет сильный разброс свойств, по которым ее принято идентифицировать. Значительные проблемы в идентификации возникают при попытках вывоза ценных пород древесины под видом малоценных. Визуального контроля и опыта контролирующего органа явно недостаточно для правильного определения породы древесины. Между тем таможенные органы и органы, проводящие экспертизу при проведении осмотра древесины и изделий из нее (пиломатериалы и др.), используют визуальный способ оценки. К ним относят: вид коры, наличие ядра, резкость перехода от ядра к заболони, твердость, текстуру, цвет, блеск, группировку и характеристику сосудов и смоляных ходов, прочие морфологические признаки. В целом на территории СНГ известны около 80 пород древесины, оценка которых визуальным методом по большому числу параметров представляется ненадежной. Для более глубокого анализа необходимо использовать длительные и достаточно затратные микроскопические, химические и физико-механические методы исследования, которые также не всегда приводят к однозначным ответам на поставленные вопросы.

Специалисты пытались решить задачу идентификации древесины путем анализа спектральных данных, полученных при помощи портативного прибора, включающего в себя спектрофотометр и анализатор спектров. Число работ, посвященных использованию аппаратных методов для контроля над качеством растительного сырья и продуктов его переработки методами спектрального, хроматографического и цветометрического анализа, также мало. В основном используются методы химического анализа и исследования физико-механических свойств, для которых характерны высокая трудоемкость и длительность, велик риск ошибки в результатах анализов, что приводит зачастую к неправильной трактовке. Известно одно сообщение, в котором упоминается использование портативного прибора для определения древесных пород [1].

Тематика данной работы отражена в двух диссертационных исследованиях [1; 2], на основании которых введена в эксплуатацию серия приборов типа «Кедр». Метод анализа достаточно сложный, так как требует снятия спектров диффузионного отражения и температурной коррекции. Имеются и определенные сомнения в эффективности данного метода, так как приводимые авторами спектры различных пород древесины зачастую перекрываются, а доверительный интервал достаточно широк [3].

В 1992 году в БГТУ (Минск) разработана система распознавания льноволокна (заказчик – ЦНИИЛВ, Москва); в 2006–2007 годах выполнена научно-исследовательская работа «Разработать и внедрить технологию производства бумаги документной на комбинированной БДМ». В результате был предложен метод идентификации, основанный на применении пиролитической хроматографии и одного из методов распознавания образов. Примерно в это же время (1992 г.) Институт физики НАН Беларуси сконструировал экспериментальный прибор «Лен», основанный на использовании метода нарушенного полного внутреннего отражения. Сущность метода заключалась в сравнении изучаемого образца с базовым и принятии решения о пригодности испытуемого продукта. Но дальнейшего продолжения данные работы не получили.

#### Основная часть

Предлагаемый нами подход не требует создания специальной аппаратуры и заключается в использовании цветного фотоснимка исследуемого объекта и стандартной системы цветиметрии, которая, как будет показано ниже, позволяет получать весьма приемлемые результаты. Сущность метода заключается в обработке цветного изображения в системах RGB, CMYK, Lab, HSB и применении метода распознавания образов для идентификации исследуемого объекта. Работа предполагает создание так называемого решающего правила на основании собранной базы данных и отнесения «спорной» породы к породе из собранной нами базы данных. В качестве решающего правила можно использовать разные подходы. Нами использовались так называемые *классификационные функции Фишера* и *вариант кластерного анализа*, известный как *метод «трех ближайших соседей»*.

Представляется, что сведения о цветовых системах RGB, CMYK, Lab, HSB и методах их обработки можно почерпнуть в [4], а вопросы классификации в системах распознавания образов в [5; 6].

#### Материалы и методы

В качестве *объектов исследования* выбраны *ель обыкновенная* (*Picea abies* (L.) Karst.) и *туя западная* (*Thuja occidentalis* L.). Данные породы были заложены в 1945 году в Центральном ботаническом саду НАНБ (Минск). Съемки ствола осуществлялись на высоте примерно 1,5 м камерой с разрешением у матрицы 8 Мп в дневное время. Для выделения исследуемой области полученные изображения обрабатывались программным продуктом «Ножницы». При помощи продукта Adobe Photoshop CC изображения усреднялись и были охарактеризованы в системах RGB, CMYK, Lab, HSB. Объем обучающей выборки – ель обыкновенная (25 образцов), туя западная (28 образцов). В качестве дискриминатора использовалась линейная разделяющая поверхность. В качестве расстояния в кластерном анализе – расстояние Евклида с предварительно стандартизированными переменными. Исследования проводились в два этапа: на *первом этапе* использовались только цветиметрические системы RGB, CMYK, Lab, HSB; на *втором этапе* они дополнялись еще одним признаком – количеством цветов в каждом образце.

В таблицах 1, 2 приведены фрагменты исходных выборок для исследуемых пород древесины для систем цвета RGB, CMYK, Lab, HSB.

Таблица 1. – Фрагмент исходной выборки цветиметрических характеристик для ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.)

Образец	R	G	B	C	M	Y	K	L	a	b	H	S	B
1	55	60	32	58	46	83	53	23	-7	20	52	28	51
5	56	60	32	59	45	82	53	23	-8	19	47	32	47
7	40	47	18	60	46	69	65	16	-10	20	51	34	49
11	84	78	53	46	48	92	39	33	0	18	41	14	52
21	64	61	45	50	49	78	52	25	-1	12	60	39	40

Таблица 2. – Фрагмент исходной выборки цветиметрических характеристик для туи западной (*Thuja occidentalis* L.)

Образец	R	G	B	C	M	Y	K	L	a	b	H	S	B
2	130	125	94	43	39	74	12	43	-1	20	69	47	24
3	120	112	82	43	43	81	18	48	1	20	71	47	24
9	125	119	83	44	40	83	15	50	-1	23	74	62	18
15	133	127	114	44	42	55	9	54	1	9	48	37	33
20	103	103	63	50	41	100	24	43	-5	25	51	30	25

**Результаты и обсуждение**

Полученные экспериментальные данные рассматривались как две обучающие выборки, к которым была применена стандартная процедура распознавания. Распознавание проводилось с учетом разного объема групп. Все четыре цветковые системы рассматривались отдельно.

В таблице 3 представлены результаты распознавания. Результаты приведены в порядке возрастания качества распознавания.

Таблица 3. – Результаты классификации с линейным дискриминатором для цветовой модели HSB

Исходная группа HSB.Col_4	Размер группы	Прогноз HSB	
		туя	ель
Туя	28	24 (85,71%)	4 (14,29%)
Ель	25	6 (24,00%)	19 (76,00%)

Очевидно, что в системе HSB процент правильно классифицированных объектов составляет 81,13%. Решающее правило имеет вид:

$$F(\text{Туя}) = -21,4694 - 0,0061799 \cdot \text{HSB.Col}_1 + 0,473819 \cdot \text{HSB.Col}_2 + 0,708042 \cdot \text{HSB.Col}_3;$$

$$F(\text{Ель}) = -16,0955 - 0,00618517 \cdot \text{HSB.Col}_1 + 0,409526 \cdot \text{HSB.Col}_2 + 0,5809 \cdot \text{HSB.Col}_3,$$

где Col\_1 – равняется значению H; Col\_2 – значению B; Col\_3 – значению S.

Данные уравнения показывают, что наибольший вклад в распознавание вносит яркость, далее следует насыщенность и цветовой тон.

Аналогичные результаты в плане правильно распознанных объектов (81,13%) получены с использованием цветовой модели Lab (табл. 4).

Таблица 4. – Результаты классификации с линейным дискриминатором для цветовой модели Lab

Исходная группа Lab.Col_4	Размер группы	Прогноз Lab	
		туя	ель
Туя	28	23 (82,14%)	5 (17,86%)
Ель	25	5 (20,00%)	20 (80,00%)

Коэффициенты для решающей функции сведены в таблицу 5.

Таблица 5. – Значения коэффициентов для решающей функции цветовой системы Lab

Цветовая система Lab	Туя	Ель
LAB.L	0,561572	0,445772
LAB.a	0,220718	0,093779
LAB.b	0,826781	0,508808
CONSTANT	-18,7757	-10,7265

Очевидно, что в данной цветовой системе наибольший вклад в классификацию вносят цветковые гаммы (a, b), а наименьший – освещенность (L). Заметим, что лучшие результаты можно получить, используя цветковые системы RGB и CMYK (табл. 6).

Таблица 6. – Результаты классификации с линейным дискриминатором для цветовой модели RGB и СМΥК

Исходная группа	Размер группы	Прогноз RGB		Прогноз СМΥК	
		туя	ель	туя	ель
Туя	28	22 (78,57%)	6 (21,43%)	24 (85,71%)	4 (4,29%)
Ель	25	3 (12,00%)	22 (88,00%)	3 (12,00%)	22 (88,00%)

Для модели RGB суммарный итог распознавания составил 83,02%, для СМΥК – 86,79%.

Наибольшая чувствительность первой цветовой системы оказалась к красному (R) цвету, наименьшая – к зеленому (G). При расчете в системе СМΥК наибольшая чувствительность зафиксирована для желтого цвета (Y), наименьшая – для пурпурного (M).

Для улучшения качества прогноза в качестве дополнительного фактора была добавлена новая величина – количество цветов для каждого образца.

Так как две последние цветометрические модели показали лучший результат, то такая процедура была применена только к ним. Таким образом, добавление нового параметра резко повысило качество классификации. Как для цветовой модели RGB, так и для модели СМΥК суммарный результат прогноза оказался равным 94,34% (табл. 7).

Этому приему значительно уступает попытка объединить две цветовые системы RGB + СМΥК. В этом случае получен результат с удачной классификацией, но составил лишь 88,68%.

Таблица 7. – Результаты классификации с линейным дискриминатором для цветовой модели RGB и модели СМΥК после добавления дополнительного параметра

Исходная группа	Размер группы	Прогноз RGB		Прогноз СМΥК	
		туя	ель	туя	ель
Туя	28	26 (92,86%)	2 (7,14%)	26 (92,86%)	2 (7,14%)
Ель	25	1 (4,00%)	24 (96,00%)	1 (4,00%)	24 (96,00%)

Как уже было сказано выше, в качестве второго метода исследования использовался метод «трех ближайших соседей». Этот метод был использован для всей выборки целиком, а это значит, что каждый из 53 объектов рассматривался поочередно как объект, подлежащий классификации. Например, для модели СМΥК (без дополнительного фактора) наблюдалось небольшое улучшение распознавания. Для туи степень верного распознавания оказалась равной 96,4%, для ели – 80,0%. В среднем результат составил 88,3%, что лишь на 2% больше, чем для распознавания с линейной дискриминирующей функцией. При использовании данного подхода к этой же модели к выборке с учетом дополнительного фактора цвета результат составил 96,2%. Учитывая тот факт, что данные методы классификации основаны на разных предпосылках, можно рекомендовать использовать их совместно.

#### Заключение

В работе исследована возможность применения различных цветометрических моделей для распознавания двух видов деревьев – туи западной и ели обыкновенной – по их изображениям.

Установлено, что из всех цветометрических систем наиболее эффективной является система СМΥК, затем следуют системы RGB, Lab, HSB.

Результаты распознавания исследуемых пород можно повысить до уровня 92...96% за счет использования дополнительного фактора – количества цветов, которыми можно охарактеризовать исследуемый объект.

Практически одинаковые результаты были получены в случае, когда в качестве решающего правила применяют метод линейного дискриминантного анализа и метод «трех ближайших соседей». Так как данные методы распознавания базируются на разных предпосылках, то их совместное использование повышает уровень доверия к полученным результатам.

Результаты, приведенные в данной работе, касаются только того объема материала, который был использован для исследования и анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ухов, А.А. Оптические спектрометры с многоэлементными фотоприемниками : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.07 / А.А. Ухов. – СПб. : С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т, 2015. – 290 с.
2. Воронин, А.А. Разработка и исследование спектрального метода и аппаратуры для оперативной идентификации пород древесины : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.11.07 / А.А. Воронин. – СПб. : С.-Петербург. гос. ун-т механики и оптики, 2011. – 20 с.
3. Воронин, А.А. К вопросу идентификации пород древесины с применением метода анализа спектров / А.А. Воронин, Е.В. Смирнова, А.П. Смирнов // Науч.-техн. вестн. С.-Петербург. гос. ун-та. – 2010. – № 2(66). – С. 5–10.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
5. Фомин, Я.А. Распознавание образов : теория и применения / Я.А. Фомин. – М. : ФАЗИС, 2012. – 429 с.
6. Фомин, Я.А. Статистическая теория распознавания образов / Я.А. Фомин, Г.Р. Тарловский. – М. : Радио и связь, 1986. – 624 с.

Поступила 03.02.2017

#### IDENTIFICATION OF WOOD USING CHROMATICITY CHARACTERISTICS

*M. ZILBERGLEIT, S. JAKUBOWSKY*

*The problem of identifying the wood using software and hardware is considered. The main methods of identifications: organoleptic methods and methods associated with the determination of the strength properties of examined objects are analyzed. The decision of this problem associated with the correct classification of tree species is proposed the classical chromaticity models RGB, CMYK, Lab, HSB that characterize wood species a particular set of parameters proposed to. For improving the accuracy of classification parameters of colour models are augmented with a parameter that takes into account the number of colours in the studied objects. It is established that of all colorimetric systems the most effective is the CMYK system, followed by the systems RGB, Lab, HSB. It has been shown that the value of correctly classified objects is depending on the chromaticity of the adopted model.*

**Keywords:** *identification, wood species, methods of recognition, chromaticity model.*

УДК 66-97

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРОВ ПИРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ; канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА  
(Полоцкий государственный университет);  
В.В. УРВАНЦЕВ  
(Petroleum Analyzer Corporation, Франция)

Рассматривается возможность определения температур паров выкипающего нефтепродукта в колбе стандартизованного аппарата простой перегонки пирометрическим методом, что позволит скорректировать нагрев испытуемых нефтепродуктов и обеспечить более четкое выполнение требований стандартных методик ко времени падения первой капли (начало кипения) в автоматическом режиме без необходимости ручной корректировки нагрева оператором. С этой целью разработана математическая модель процесса теплообмена между парами нефтепродукта и окружающей средой. Проведен эксперимент и по экспериментальным данным осуществлена проверка разработанной модели теплообмена.

**Ключевые слова:** анализаторы, фракционный состав, температура, пирометр, теплопередача.

**Введение.** В современных автоматических анализаторах фракционного состава светлых нефтепродуктов возникает необходимость пирометрического контроля температур нагрева исходных проб испытуемых веществ, что особенно важно в случае загрузки в колбу анализатора продукта с малоизвестными свойствами. Это позволит избежать перегрева и «бурного вскипания» легкокипящих, а также ускорить нагрев высококипящих нефтепродуктов и обеспечить выполнение требований стандартных методик перегонки по времени падения первой капли (начало кипения) в автоматическом режиме без необходимости ручной регулировки нагрева оператором.

Для разработки методики пирометрического управления нагревом предварительно проведем эксперимент с эталонным индивидуальным углеводородом на приборе AD86 5G. Результаты эксперимента представлены на рисунках 1–2.

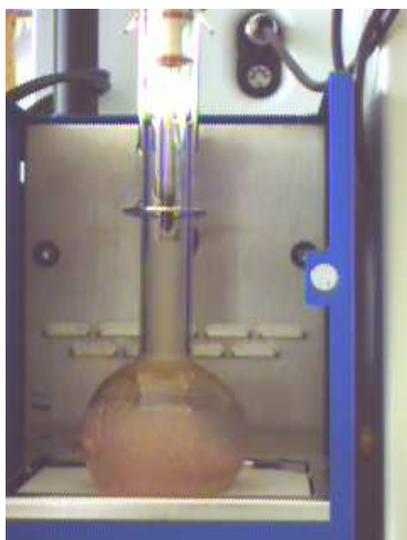


Рисунок 1. – Процесс кипения углеводородов в колбе прибора AD86 5G

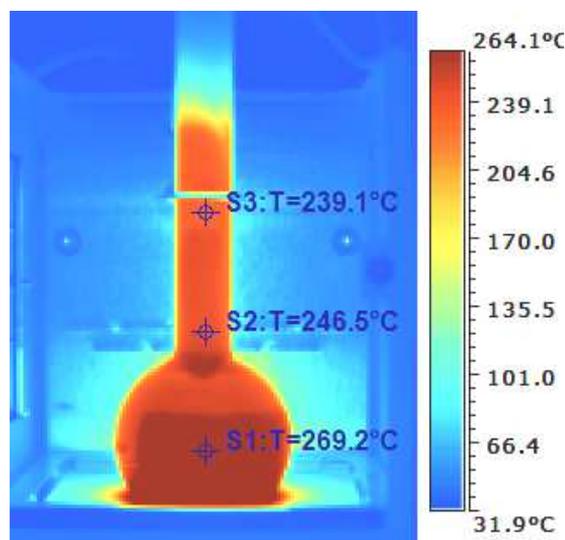


Рисунок 2. – Фотоснимок, полученный с помощью тепловизора (пирометра)

Для разработки математического описания тепловых процессов в колбе составим математическую модель процесса теплопередачи через стенку колбы (рис. 3). Основное уравнение теплопередачи [1]:

$$Q = KF\Delta t, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи;  $F$  – поверхность теплопередачи,  $m^2$ ;  $\Delta t$  – средняя разность температур между конденсирующимся паром и окружающим воздухом.

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + (\delta/\lambda)_c + 1/\alpha_2} \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи конденсирующегося пара на вертикальной поверхности  $\alpha_1$  (рис. 4) определяем по следующей формуле [2]:

$$\alpha_1 = 2,04 \varepsilon_k \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H} \cdot \Delta t_k^{-0,25}}, \quad (3)$$

где представлены теплофизические свойства конденсата:  $\rho_k$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\mu_k$  – коэффициент динамической вязкости Па·с;  $r_k$  – удельная теплота испарения (конденсации), Дж/кг;  $H$  – высота пленки конденсата, м;

$$\Delta t_k = t_k - t_{\text{вн.ст.}}; \quad (4)$$

$(\delta/\lambda)_{\text{ст.}}$  – термическое сопротивление стеклянной стенки.

Поправочная функция  $\varepsilon_k = \left[ \left( \frac{\lambda_{\text{ст.}}}{\lambda_k} \right)^3 \frac{\mu_k}{\mu_{\text{ст.}}} \right]^{1/8}$ , учитывающая влияние переохлажденного конденсата

на процесс теплоотдачи. Значение этой функции может быть существенным для вязких конденсатов при больших  $\Delta t_k$ .

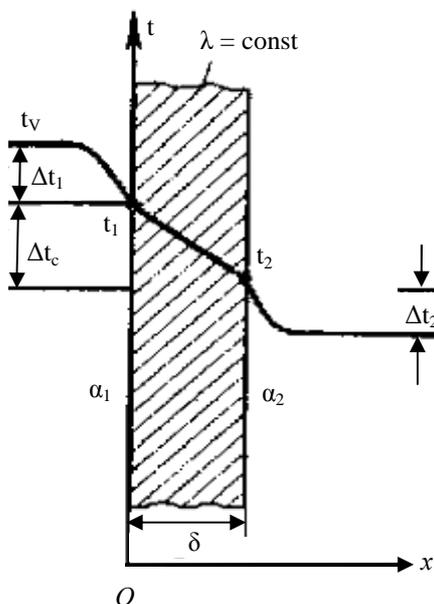


Рисунок 3. – Процесс теплопередачи через стенку колбы

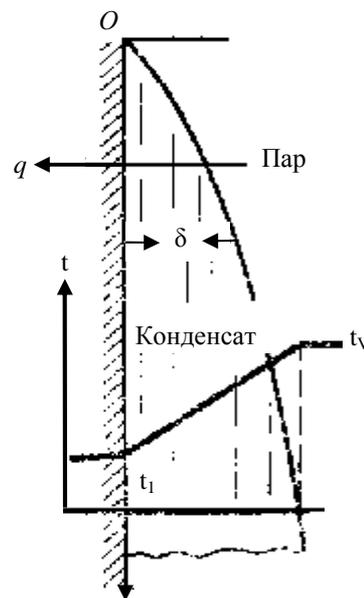


Рисунок 4. – Процесс теплоотдачи при конденсации пара

Коэффициент теплоотдачи от горячей вертикальной стенки к окружающему воздуху [2]

$$\alpha_2 = 1,98 \sqrt[4]{t_2 - t_g}. \quad (5)$$

Плотность теплового потока (теплонпряженность)

$$q = \frac{Q}{F} = K \Delta t. \quad (6)$$

Тепловой поток от конденсирующегося пара

$$q_k = \alpha_1(t_v - t_1). \quad (7)$$

Тепловой поток через стенку колбы

$$q_c = \frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}}(t_1 - t_2). \quad (8)$$

Поток тепла, идущий от наружной стенки к окружающему воздуху

$$q_g = \alpha_2(t_2 - t_g). \quad (9)$$

Пренебрегая величиной тепла, идущего на нагрев стенки колбы  $\left(c_{cm} m_{cm} \frac{dt}{d\tau} \approx 0\right)$ , исходя из теплового баланса можно получить тождество:

$$q_k \approx q_{cm} \approx q_g = q. \quad (10)$$

Подставив уравнение (5) в (9), получим

$$q_g = 1,98(t_2 - t_g)^{1,25}. \quad (11)$$

Данная формула справедлива при относительно невысоких температурах. При повышенных температурах имеет место наряду со свободной конвекцией и тепловое излучение. Тогда формулу (10) можно переписать следующим образом:

$$q_k \approx q_{cm} \approx (q_g + q_\lambda) = q. \quad (12)$$

Таким образом, температуру наружной стенки определим по показаниям пирометра (тепловизора).

$$q_\lambda = 5,7\epsilon_\lambda \left[ \left( \frac{t+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_g+273}{100} \right)^4 \right]. \quad (13)$$

где  $\epsilon_\lambda$  – коэффициент излучения. Для стекла  $\epsilon_\lambda = 0,937$  [2].

Тогда, преобразовав формулу (8), определим температуру внутренней стенки колбы:

$$t_1 = \frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}} q + t_2. \quad (14)$$

Теплофизические свойства углеводородного конденсата в первом приближении определим при температуре внутренней стенки колбы. При величине

$$\Delta t_k = \Delta t_1 = (t_v - t_1), \quad (15)$$

составляющей более 30...40 °С, расчет можно уточнить.

Из формулы в [3–4] для расчета характеризующего фактора углеводородов

$$K_x = \frac{1,216\sqrt[3]{t_k + 273}}{\rho_{15}^{15}}$$

найдем относительную плотность, приняв для углеводородов парафинового ряда  $K_x = 12$ :

$$\rho_{15}^{15} = \frac{1,216\sqrt[3]{t_k + 273}}{K_x}, \quad (16)$$

$$\rho_4^{20} = \rho_{15}^{15} - 0,0093. \quad (17)$$

Плотность узких нефтяных фракций (УНФ) при температуре кипения определим по формуле Мановяна [5]:

$$\rho_t = 1000\rho_4^{20} - \frac{0,058}{\rho_4^{20}}(t_k - 20) - \frac{t - 1200 \cdot (\rho_4^{20} - 0,68)}{1000}(t_k - 20). \quad (18)$$

Коэффициент теплопроводности конденсата вычислим по формуле Крэга [3]:

$$\lambda_k = \frac{0,1175}{\rho_{15}^{15}}(1,1472 - 0,00054(t_k + 273)). \quad (19)$$

Удельную теплоту конденсации (испарения) УНФ вычислим по уравнению Уэйра – Иттона [3], Дж/кг:

$$r_k = \left[ \frac{993,5 - 6661,5\rho_{15}^{15} - (t_k + 273)(1,733 - 1,813\rho_{15}^{15})}{-(t_k + 273)^2(0,00059\rho_{15}^{15} - 0,00015)} \right] \cdot 10^3. \quad (20)$$

Коэффициент динамической вязкости конденсата найдем по приближенной формуле [3], Па·с:

$$\mu_t = \frac{0,008(\rho_t)^{0,5}}{1000}. \quad (21)$$

Преобразовав уравнения (3), (7) и (13), получим

$$q_k = 2,04 \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H}} \cdot \Delta t_1^{3/4}, \quad (22)$$

отсюда

$$\Delta t_1 = \left[ \frac{q}{2,04 \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H}}} \right]^{4/3}. \quad (23)$$

Вероятная температура углеводородных паров

$$t_v = \Delta t_1 + t_1. \quad (24)$$

Для практической реализации в случае перегонки сложных смесей нефтепродуктов, в которых обязательно требуется информация о вязкостно-температурной зависимости, использование формулы (23) затруднительно. Поэтому целесообразно воспользоваться экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи. На основе обработки экспериментальных данных были получены численные значения коэффициентов теплоотдачи конденсации углеводородных паров на стенке горловины колбы в точках S2 и S3 (см. рис. 2), которые приблизительно составляют:

$$\alpha_{S2} = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{S3} = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Представив численные значения  $\alpha_{S2}$  и  $\alpha_{S3}$  как соотношение, получим

$$\varepsilon_S = \frac{\alpha_{S3}}{\alpha_{S2}} = 0,7, \quad (25)$$

отсюда видно, как влияет переохлажденный конденсат на значение коэффициентов теплоотдачи в различных точках горловины колбы. К тому же в зоне пароотводной трубки может присутствовать незначительное количество воздуха, которое приводит к снижению коэффициента теплоотдачи при конденсации паров.

Рассчитаем значения коэффициентов теплопередачи в точках S2 и S3.

В точке S1 коэффициент теплопередачи определяется с учетом того, что  $1/\alpha_{S1} \ll \delta/\lambda_{cm.}$ :

$$\begin{cases} K_{S1} = \frac{1}{(\delta/\lambda_{cm.})}, \\ K_{S2} = \frac{1}{1/\alpha_{S2} + (\delta/\lambda_{cm.})}, \\ K_{S3} = \frac{1}{1/\alpha_{S3} + (\delta/\lambda_{cm.})}. \end{cases} \quad (26)$$

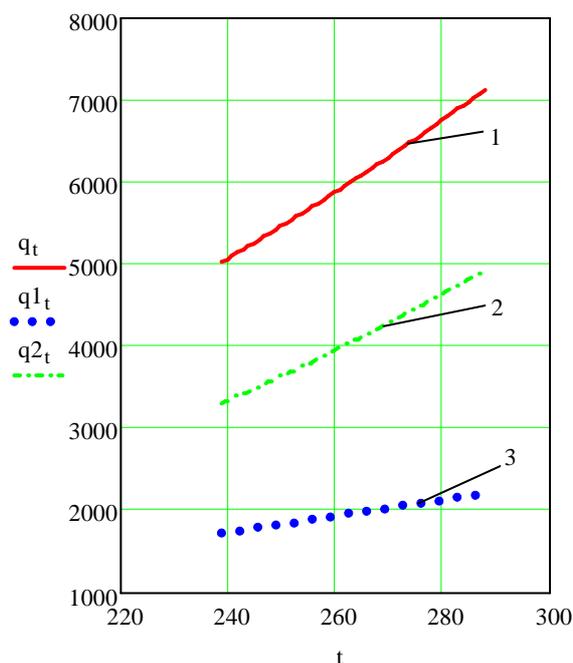
Численные значения коэффициентов теплопередачи в точках S1, S2 и S3 составляют:

$$K_{S1} = 102 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad K_{S2} = 128 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad K_{S3} = 330 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Подставив значения коэффициентов теплопередачи, предварительно преобразовав формулу (6), можно вычислить вероятную температуру испытуемого продукта в конкретных точках колбы:

$$t_{vs} = \frac{q}{K_s} + t_s. \quad (27)$$

На основании изложенной выше методики с помощью программного пакета MathCAD проведем математическое моделирование процесса, происходящего в колбе. На рисунке 5 представлена зависимость теплового потока  $q_t$ , проходящего через стенку колбы в контрольной точке по температурным показаниям пирометра и его составляющих. График позволяет численно оценить значения тепловых потоков через стенку колбы в контрольной точке.



**Рисунок 5. – Зависимость теплового потока  $q_t$ , проходящего через стенку колбы в контрольной точке по температурным показаниям пирометра  $q_t$  (линия 1) и его составляющих:  $q1_t$  – конвективная (точечная линия 3) и  $q2_t$  – лучистая (пунктирная линия 2)**

Как видно из рисунка 5, составляющая потеря тепла выше излучением, чем конвекцией.

На основе формулы (27) построим зависимости температур продукта в колбе в различных точках от показаний пирометра (рис. 6). По оси абсцисс графика – значения пирометра; по оси ординат – значения температур продукта в колбе. Прямые отображают зависимости этих температур в соответствующих контрольных точках (S1, S2 и S3). Из графиков, изображенных на рисунке 6, видно, что пунктирные прямые пересекают контрольную линию (1), соответствующую температуре паров в колбе (288 °С), в точках по оси абсцисс, близких к своим экспериментальным значениям.

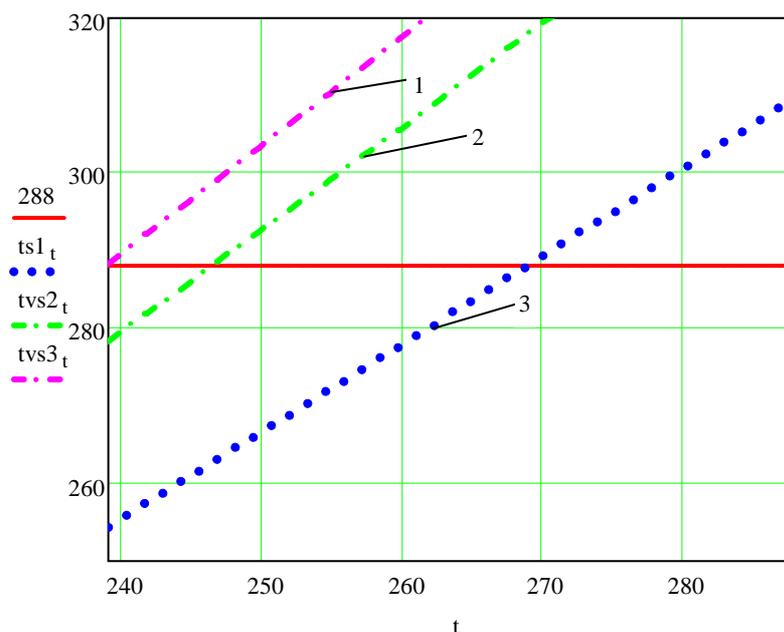


Рисунок 6. – Зависимости вероятных температур нефтяных фракций от показаний пирометра в контрольных точках колбы

**Заключение.** Полученные расчетные значения температур соответствуют экспериментальным значениям температуры 288 °С. Следовательно, результаты расчетов позволяют говорить о том, что данную математическую модель можно использовать для прогнозирования температур испытуемого нефтепродукта по значениям пирометра. Таким образом, согласно зависимостям (рис. 6), по показаниям пирометра можно определить вероятную температуру паров в колбе (распределение температур). Представленная методика позволяет скорректировать программу управления нагревом проб испытуемого вещества в автоматических анализаторах фракционного состава светлых нефтепродуктов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд. пер. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
2. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л. : Химия, 1968. – Т. V. – 963 с.
3. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки : справочник / Г.Г. Рабинович [и др.] ; под ред. Е.Н. Судакова. – М. : Химия, 1979. – 568 с.
4. Александров, И.А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке / И.А. Александров. – М. : Химия, 1979. – 361 с.
5. Мановян, А.К. Лабораторная перегонка и ректификация нефтяных смесей / А.К. Мановян, Д.А. Хачатурова, В.В. Лозин. – М. : Химия, 1984. – 240 с.

Поступила 28.12.2016

#### MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE PROBABILITY OF VAPOR TEMPERATURES BY PYROMETRIC METHOD

A. SPIRIDONOV, E. SAFRONOVA, V. URVATSEV

*The paper considers the possibility of calculating the temperature of vapor boiling oil in the flask standardized apparatus simple gradual distillation pyrometric method that allows to adjust the heating test of petroleum products and to provide clearer compliance standard procedures by the time of the fall of the first drop (beginning of boiling) automatically, without the need for manual adjustment of the heating operator. To this end, developed a mathematical model of heat transfer between the pairs of petroleum and the environment. The experiment and the experimental data verification has developed heat transfer model.*

**Keywords:** analyzers, fractional composition, temperature, thermometer, heat transfer.

УДК 628.33

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛИЗА СЫРОГО ОСАДКА НА ДЕФОСФОТАЦИЮ СТОЧНЫХ ВОД

А.В. ГАЛУЗО

(Витебскводоканал);

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО

(Полоцкий государственный университет)

Исследуется гидролиз сырого осадка на очистных сооружениях канализации города Витебска. Представлена технология ацидофикации сырого осадка первичных отстойников, позволяющая повысить концентрацию легкоокисляемых органических соединений в сточной воде, необходимых для интенсификации биологического процесса глубокого удаления фосфора. Отработана методика исследований, проведены эксперименты. Анализ полученных результатов показал, что применение процесса ацидофикации сырого осадка повышает эффективность очистки сточных вод от биогенных элементов и является перспективным технологическим приемом на очистных сооружениях.

**Ключевые слова:** процессы дефосфотации, сточные воды, биогенные элементы, сырой осадок, ацидофикация, дефосфотация.

Решение проблемы охраны и рационального использования водных ресурсов неразрывно связано с проведением комплекса мероприятий по предотвращению загрязнения водных источников. В последние годы стало очевидным отрицательное воздействие биогенных элементов (азота и фосфора), поступающих со сточными водами в водоемы. Удаление азота и фосфора из сточных вод может быть осуществлено различными способами: физико-химическими, химическими и биологическими.

Непрерывно ужесточающиеся требования к качеству очищенных сточных вод требуют модернизации существующих технологических схем очистных сооружений. На очистных сооружениях Республики Беларусь все большее распространение находят технологические схемы с позонным разделением аэротенка на процессы нитри-денитрификации и биологической дефосфотации. Это наиболее доступный для практической реализации и экономически выгодный метод удаления биогенных элементов. В результате нитри-денитрификации аммонийный азот превращается в нитратный, а затем в молекулярный азот, удаляемый при аэрации в атмосферу. На стадии денитрификации (биовосстановления нитратов до молекулярного азота) биоокисление органических веществ осуществляется не кислородом, а нитратами, что позволяет сократить расход аэрирующего воздуха и затраты на аэрацию.

Технология биологической дефосфотации приводит к повышенному потреблению фосфатов, которые выводятся из системы обработки стоков вместе с иловой смесью. При этом фосфор накапливается в клетках фосфорных бактерий в виде гранул полифосфатов. Создание условий для удовлетворительного протекания данных процессов каждой стадии будет существенно влиять на окончательный результат очистки сточных вод от фосфорных соединений.

На эффективность удаления фосфора влияют:

- содержание летучих жирных кислот (ЛЖК);
- соотношения БПК:ХПК (биохимического и химического потребления кислорода), С:Р, БПК:Р, БПК:N;
- температура;
- содержание кислорода;
- величина окислительно-восстановительного потенциала.

Экспериментально доказано, что для удаления в процессе денитрификации 1 кг азота в виде нитратов требуется добавлять 4...6 кг легкоокисляемой органики, а для удаления 1 кг растворенных форм фосфора из сточных вод необходимо вносить 10 кг легкоокисляемой органики [1].

При недостаточном содержании легкоокисляемой растворимой органики возможно применение следующих методов:

- исключение из технологической цепочки первичных отстойников;
- добавление в биологический реактор готовых химических соединений или их растворов, например метанола;
- проведение гидролиза сырого осадка с подачей в биологический реактор осветленных сточных вод, содержащих высокие концентрации легкоокисляемой органики.

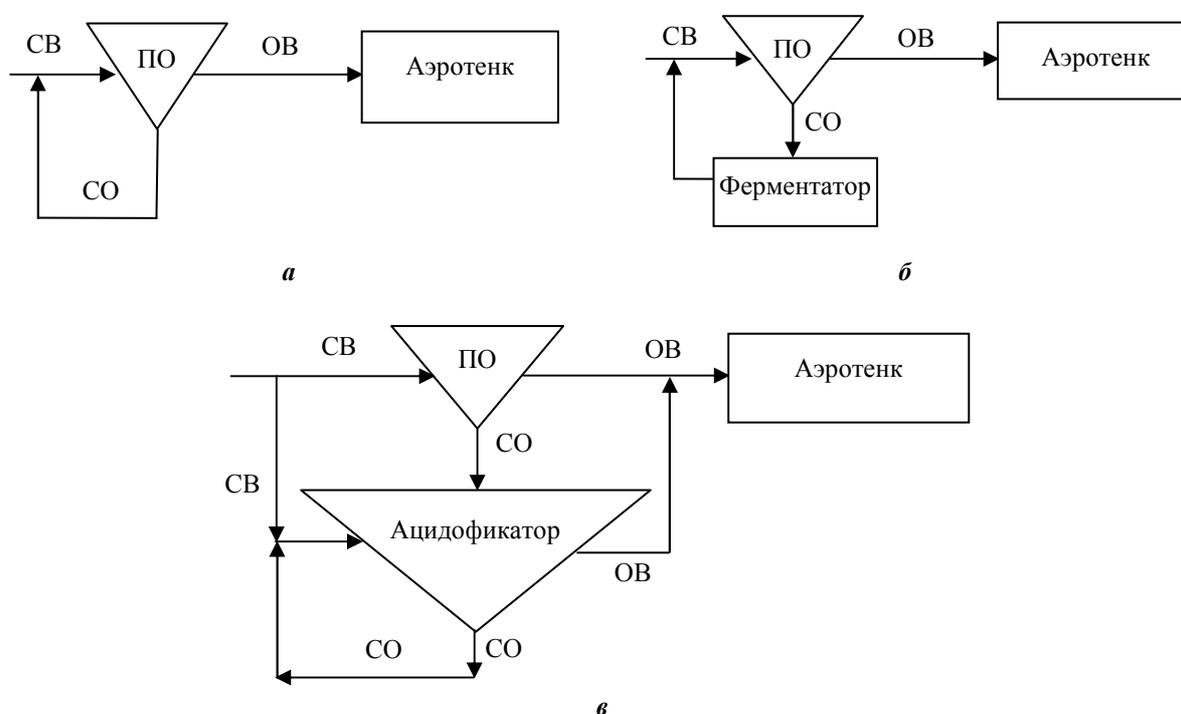
Процесс анаэробного сбраживания сырого осадка – наиболее перспективный метод для повышения эффективности протекания биологических процессов. С его применением на очистных сооружениях можно решить ряд вопросов, возникающих в процессе очистки:

- оздоровление активного ила в случаях нарушения флокулообразования, седиментации, так как ил обеспечен легкоокисляемой органикой;

- снижение токсического воздействия на активный ил промышленных токсикантов за счет анаэробного разложения их в процессе брожения;
- глубокое удаление всех биогенных элементов, включая соединения серы и фосфора за счет обеспечения анаэробной зоны восстановителями;
- улучшение влагоотдающих свойств сырого осадка и снижение его объема;
- интенсификация биологической очистки на сооружениях малой канализации.

В анаэробных условиях углеродосодержащие органические вещества сырого осадка разлагаются с образованием жирных кислот, спиртов, углекислоты, окиси углерода, воды, водорода и метана. При брожении жиров вначале образуются летучие жирные кислоты, которые затем при помощи метанобактерий разлагаются до метана и углекислого газа. Азотсодержащая органика разлагается с образованием аммиака и свободного азота, серосодержащая – с образованием сероводорода. Нерастворимые органические вещества сырого осадка в результате анаэробного сбраживания трансформируются в легкоокисляемую органику.

Процесс гидролиза сырого осадка может быть реализован по разнообразным технологическим схемам. Процесс ацидофикации сырого осадка на очистных сооружениях возможно организовать в существующих действующих отстойниках либо в дополнительно построенных сооружениях – ацидофикаторах (рис. 1, а, б, в). Первичный осадок может быть также гидролизован в отдельном уплотнителе на потоке первичного осадка.



СВ – сточная вода; ОВ – осветленная вода;  
СО – сырой осадок; ПО – первичный отстойник

Рисунок 1. – Варианты организации гидролиза сырого осадка

Эффективность удаления фосфора из сточных вод при использовании схем биологической очистки составляет: без ацидофикации 60...70%; с предварительной ацидофикацией – 70...90%; с последующим применением реагентов – 80...95% [2].

Исследования по возможному внедрению технологии ацидофикации сырого осадка проводились на реальной сточной воде станции аэрации.

Существующая в настоящее время технологическая схема очистки сточных вод состоит из таких основных узлов, как механическая очистка, биологическая очистка совместно с вторичным отстаиванием, обеззараживание и выпуск очищенных стоков в Западную Двину.

Предварительное осветление сточных вод осуществляется на решетках и песколовках и далее – в четырех первичных радиальных отстойниках. При этом используются три отстойника диаметром 28 м и один отстойник диаметром 30 м. Сырой осадок направляется на иловые площадки.

После механической очистки осветленные воды подвергаются биологической очистке в аэротенках-вытеснителях двухкоридорного типа (50% от общего стока) и комплексных сооружениях биологической очистки – биоблоках [3].

В ходе внедрения технологии ацидофикации были изменены эксплуатационные режимы первичных отстойников. Три отстойника диаметром 28 м продолжали выполнять функцию осветления сточной воды, один отстойник диаметром 30 м был переведен в режим уплотнения ила для процессов ацидофикации. В отстойнике-ацидофикаторе устанавливается дополнительное оборудование для циркуляции сырого осадка внутри сооружения. Схема организации процесса представлена на рисунке 2.

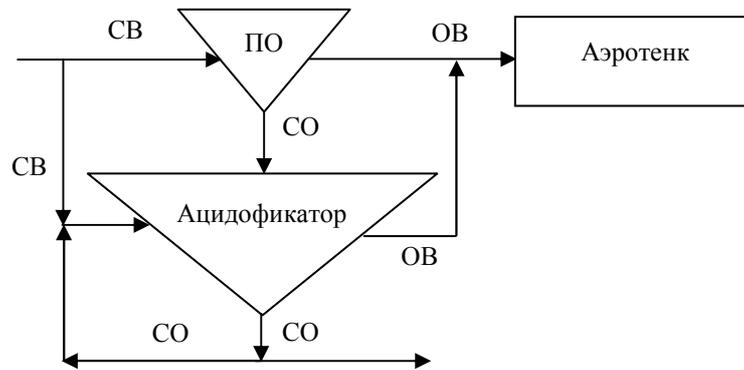


Рисунок 2. – Технологическая схема организации процесса ацидофикации на очистных сооружениях города Витебска

Осветленная вода после всех первичных отстойников, смешиваясь, поступает в камеру и с высоким содержанием легкоразлагаемой органики распределяется по сооружениям биологической очистки.

Объем подаваемых сточных вод на отстойник-ацидофикатор меньше, чем на отстойниках в обычном режиме; контролировался по температуре в сооружении и взвешенным веществам. Осадок отгружался из отстойников и осветлителей ежедневно, из отстойника-ацидофикатора – в зависимости от контрольных показателей.

В процессе эксперимента температура в сооружениях (осветлителях и ацидофикаторе) оставалась постоянной  $+15...16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является нижней границей оптимума для удовлетворительной ацидофикации. Концентрация водородных ионов является важным показателем при гетероацидогенном процессе. Оптимум рН находится в диапазоне  $6,2...7,6$ . В течение наблюдаемого периода выявлено, что в отстойнике-ацидофикаторе сточные воды несколько подкисляются (рН  $7,2...7,5$ ), в то время как в распределительной камере и в отстойниках-осветлителях рН составляет  $8,0...7,8$ . Окислительно-восстановительный потенциал в ацидофикаторе несколько больше, чем в отстойниках-осветлителях, и колебался в пределах  $-200...350\text{ мВ}$ , что свидетельствует о восстановительных условиях (анаэробных процессах).

Основной критерий ведения процесса – содержание концентрации ХПК в осветленной воде.

Время пребывания сырого осадка в отстойнике-ацидофикаторе определялось по изменению содержания ХПК в осветленном стоке [4]. Изменение концентрации ХПК в ходе эксперимента проиллюстрировано рисунком 3.

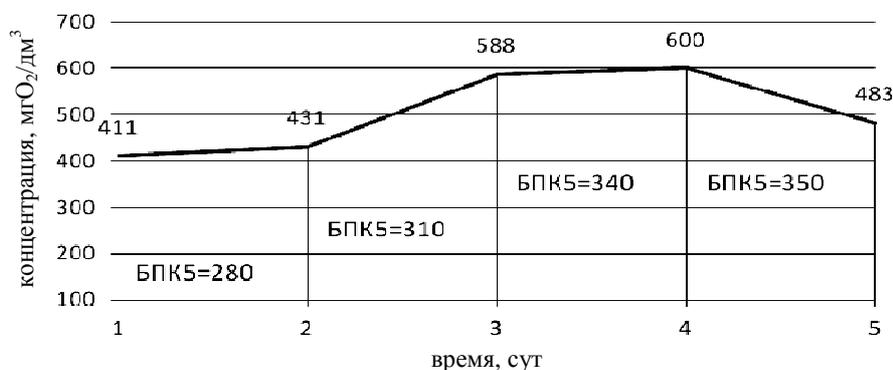


Рисунок 3. – Изменение концентрации ХПК в осветленной воде отстойника-ацидофикатора

Из графика видно, что нарастание ХПК происходит в течение четырех суток, а затем наблюдается резкое снижение, что свидетельствует об окончании процесса и необходимости отгрузки осадка из отстойника. После отгрузки осадка возобновляется процесс на новых порциях осадка.

В ходе эксперимента выявлено повышение содержания БПК в поступающем на сооружения биологической очистки стоке, что улучшает эффективность удаления соединений азота фосфора на этой стадии очистки с позонным делением.

Полученные данные (табл. 1) указывают на изменение фосфора в различных технологических зонах сооружений. Так, в результате гидролиза сырого осадка активизируются процессы выделения фосфора в бескислородных зонах, а затем активного поглощения фосфатаккумуляирующими организмами (бактериями) в аэробных условиях [5].

Таблица 1. – Средние данные загрязняющих веществ в ходе эксперимента

Показатель, мг/дм <sup>3</sup>	Сточная вода перед первичными отстойниками	Сточная вода после отстойника-осветлителя	Сточная вода после отстойника-ацидофикатора	Выпуск очищенных сточных вод	
				аэротенки	биоблок
БПК <sub>5</sub>	310,3	276,5	320,3	22,2	7,3
Азот аммонийный	55,9	53,3	52,1	12,7	6,9
Фосфор общий	4,2	4,8	5,1	1,2	0,7

**Заключение.** Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что применение процесса ацидофикации сырого осадка является перспективным технологическим приемом на очистных сооружениях, обеспечивающим биологические процессы легкодоступной органикой, повышая тем самым эффективность очистки сточных вод от биогенных элементов. Для определения оптимального эксплуатационного режима первичных отстойников и отработки методики проведения процесса ацидофикации необходимо проведение дальнейших специальных исследований совместно с биохимической и реагентной очисткой сточных вод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце [и др.]. – М. : Мир, 2009.
2. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод в сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М. : Акварос, 2003.
3. Ющенко, В.Д. Анализ работы сооружений для удалений соединений фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска / В.Д. Ющенко, Т.С. Куприянчик, А.В. Галузо // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 115–119.
4. Прикладная экобиотехнология : учеб. пособие : в 2 т. Т. 1 / А.Е. Кузнецов [и др.]. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 485 с.
5. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск : Континент, 2011.

Поступила 09.02.2017

#### THE EFFECT OF HYDROLYSIS OF PRIMARY SLUDGE FOR PHOSPHORUS REMOVAL FROM WASTEWATER

A. HALUZA, V. YUSHCHANKA

*The article describes results of research on the hydrolysis of primary sludge at the wastewater treatment plant city of Vitebsk. The technology of acidification of raw sludge of primary sedimentation plants makes it possible to increase the concentration of readily oxidizable organic compounds in wastewater which are necessary for organization of the process of advanced biological removal of phosphorus. A technique for research, conducting experiments, analyzed of the results.*

**Keywords:** *dephosphotization processes, sewage, biogenic elements, crude sediment, acidification, dephosphatization.*

УДК 66.045.53

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАДИРЕН  
ЗАВОДА «ПОЛИМИР» ОАО «НАФТАН»**

*канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ; канд. техн. наук Е.В. САФРОНОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлен сравнительный анализ работы вентиляторных и эжекционных градирен. Показаны их преимущества и недостатки. Рассмотрены особенности работы эжекторов в градирнях. Произведена оценка энергоэффективности при использовании эжекционных градирен. Показано, что вентиляторные градирни могут быть переоборудованы в эжекционные, причем реконструкция возможна с незначительными капитальными затратами: сохраняется корпус ранее функционирующей градирни, но меняется его обшивка; при необходимости производится ремонт несущих конструкций, устанавливается коллектор с эжекционными форсунками.*

**Ключевые слова:** градирня, энергоэффективность, реконструкция, охладители, эжектор.

**Введение.** Охлаждение продуктов в нефтеперерабатывающей промышленности с 40 до 20 °С производится при помощи оборотной воды, охлажденной на градирнях. Для достижения еще более низкой температуры продукта могут применяться компрессионные установки. Из-за большого потребления электроэнергии такими установками отвод тепла от технологических продуктов становится в 10...15 раз дороже, чем с помощью оборотной воды. В энергетической, химической, нефтеперерабатывающей промышленности и других отраслях отвод тепла от промышленных аппаратов с помощью градирен характеризуется как способ, который обеспечивает экономию свежей воды около 95%.

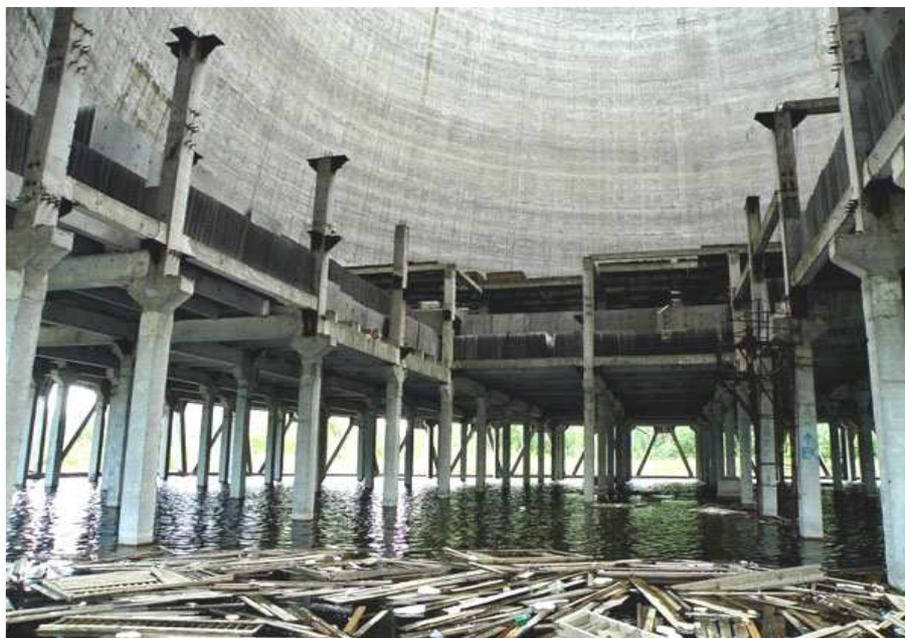
Система охлаждения, построенная на основе испарительной градирни, наряду с достоинствами обладает рядом *недостатков*:

- низкое качество воды, ее загрязненность вследствие контакта с пылью окружающего градирню воздуха;
- загрязнение системы солями, которые постоянно накапливаются из-за непрерывного испарения воды. От каждого кубического метра водопроводной испарившейся воды в системе происходит накопление как минимум 100 г солевых отложений, что приводит к резкому уменьшению коэффициента теплопередачи на теплообменных поверхностях и, следовательно, эффективности теплообмена;
- развитие в системе водорослей и микроорганизмов, включая опасных бактерий, за счет активной аэрации;
- непрерывное окисление и коррозия металла;
- обледенение градирен в зимний сезон;
- отсутствие гибкости и точности регулировки температуры;
- постоянные затраты на воду и химические реагенты для очистки;
- большие потери давления в системе.

Экологические проблемы работы градирен возникают по мере роста производительности этих сооружений и их числа на промышленной площадке, а также с приближением производственных объектов к жилой застройке и транспортным магистралям. Основными вредными факторами, производимыми градирнями, являются шум и воздействие аэрозолей, выбрасываемых из градирен в окружающую среду. Вредное воздействие происходит в результате выброса капель оборотной воды в атмосферу, осадения капель на почву и поверхность окружающих объектов. В каплях могут содержаться ингибиторы коррозии и химические реагенты, добавляемые в оборотную воду для предотвращения биологических обрастаний. Кроме этого, в каплях могут присутствовать патогенные микроорганизмы, бактерии, вирусы, грибы. Некоторые микроорганизмы в градирнях при благоприятных для их жизнедеятельности условиях могут размножаться.

Капли воды распространяются в атмосфере в районе градирен, увлажняя поверхность земли и близко расположенные сооружения, а в зимний период вызывают обледенение самих градирен, поэтому при их возведении необходимо соблюдать допустимые минимальные расстояния до ближайших сооружений согласно СНиП II-89-80. Зона выпадения капельной влаги на поверхности земли имеет форму эллипса с большой осью, проходящей через центр градирни в направлении ветра. Размер зоны зависит от высоты градирни, скорости ветра, степени турбулентности воздуха в приземном слое, концентрации и крупности капель, а также от температуры и влажности атмосферного воздуха. При наличии в атмосферном воздухе газообразных примесей выходящая из градирен влага может с ними взаимодействовать и образовывать вредные для окружающей среды соединения (например, при взаимодействии влаги с окислами серы образуются вредные для человека сульфаты).

В зимнее время эксплуатация градирен осложняется из-за обмерзания их конструкций. Обледенение градирен может привести к аварийному их состоянию, вызывая деформации и обрушение оросителя вследствие дополнительных нагрузок от образовавшегося на нем льда (рис. 1).



**Рисунок 1. – Разрушение водораспределительной системы из-за дополнительных нагрузок от образовавшегося на ней льда**

Обмерзание градирни начинается обычно при температурах наружного воздуха ниже минус  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и происходит в местах, где входящий в градирню холодный воздух соприкасается с относительно небольшим количеством теплой воды. Внутреннее обледенение градирни является опасным, так как из-за интенсивного туманообразования оно может быть обнаружено только после разрушения оросителя. Поэтому в зимний период не следует допускать колебаний тепловой и гидравлической нагрузок, необходимо обеспечивать равномерное распределение охлаждаемой воды по площади оросителя и не допускать понижения плотности орошения на отдельных участках. В связи с большими скоростями входящего воздуха плотность орошения в вентиляторных градирнях в зимнее время целесообразно поддерживать не менее  $10\text{ м}^3/\text{м}^2$  (не ниже 40% от полной нагрузки). Критерием для определения необходимого расхода воздуха может служить температура охлажденной воды. Если расход поступающего воздуха регулировать таким образом, чтобы температура охлажденной воды была не ниже  $+12\dots+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обледенение градирен обычно не выходит за пределы допустимого.

Уменьшение поступления в градирню холодного воздуха может быть достигнуто отключением вентилятора или переводом его на работу с пониженным числом оборотов. Исключить обледенение градирен можно путем подачи всей воды только на часть градирен с полным отключением остальных, иногда со снижением расхода циркуляционной воды. Нагнетательные вентиляторы подвержены обмерзанию. Это может быть вызвано двумя причинами: попаданием на вентилятор водяных капель изнутри градирни и рециркуляцией уходящего из градирни воздуха, содержащего мелкие капли воды и пар, который конденсируется при смешении с холодным наружным воздухом. Следует отметить, что неравномерное образование льда на лопастях может приводить к разбалансировке и вибрации вентилятора. Если в зимний период по какой-либо причине производилось отключение вентиляторов градирен, перед их пуском необходимо контролировать состояние обечеек, при обнаружении наледи ее необходимо удалить во избежание поломки рабочих колес вентиляторов.

Альтернативным решением этой проблемы могут стать охладители эжекционного типа, которые относятся к прямоточным распылительным аппаратам и позволяют снизить удельные материальные и эксплуатационные затраты. Вода впрыскивается в аппарат через систему форсунок под избыточным давлением  $0,2\dots0,4\text{ МПа}$ . Максимальной энергетической эффективности распыления соответствует перепад давления на форсунке  $0,2\dots0,3\text{ МПа}$ . Воздух эжектируется потоком капель и вовлекается в область зоны контакта. Достигнув стенок в зоне сепарации, капли воды теряют импульс и стекают в виде пленок в нижнюю часть аппарата. Форсунка нового поколения с пульсирующим факелом (рис. 2) начинает работать с напора  $0,09\text{ кг/см}^2$ . При напоре  $0,02\text{ МПа}$  высота факела составляет  $2\text{ м}$ , диаметр факела  $4\text{ м}$ , производительность  $15\text{ м}^3/\text{ч}$  при пульсирующем режиме работы [7–8].

Использование эжекционно-струйных форсунок, позволяющих получать сплошной факел распыла, незаменимо для создания эжекционных контуров охладителей. Форсунки почти не замерзают в зимний период, так как через них постоянно проходит теплая вода, а сами они изготовлены из материала с низкой теплопроводностью. Форсунки расположены таким образом, что при остановке градирни часть воды из них сливается. При этом в форсунке остается незначительное ее количество, которое при замерзании не приведет к разрушению элементов. Оставшейся без воды части зазора форсунки достаточно, чтобы при повторном включении градирни обеспечить приток горячей воды через форсунку, обеспечив тем самым ее разогрев и освобождение ото льда.

Существующие вентиляторные градирни могут быть переоборудованы в градирни эжекционно-брызгального типа. При этом корпусом создаваемой градирни служит корпус вентиляторной, заменяется лишь обшивка корпуса, при необходимости производится ремонт несущих конструкций. Устанавливается коллектор с эжекционными форсунками, причем коллектор выполнен и установлен так, что форсунки располагаются в воздухоходных окнах и обращены внутрь градирни. Во вновь возводимую градирню по периметру устанавливаются эжекционные модули. Форсунки располагаются напротив окон эжекционных модулей в несколько рядов. В процессе работы корпус градирни служит только для направления водовоздушных потоков.

Сравнительная характеристика различных типов градирен приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика вентиляторных и эжекционных градирен

Вентиляторная градирня	Эжекционная градирня
Элементы внутренней насадки подвержены разрушению и труднодоступны для замены	Элементы внутренней насадки отсутствуют
Разбрызгивающие форсунки подвержены засорению и труднодоступны для осмотра и чистки	Разбрызгивающие форсунки легкодоступны для чистки
Для чистки и ремонта оросителя необходимо выключить градирню	Можно чистить форсунки без остановки всей градирни
Перегорают двигатели вентиляторов, нарушается балансировка, высокий уровень шума и вибрации	Вентиляторы отсутствуют, градирня является малошумной, нет вибрации
В зимнее время повторный пуск после остановки практически невозможен	Свободно работает в режиме включения / выключения в любое время года
Обмерзание и ледообразование приводит к разрушению внутренних элементов	Не разрушается при ледообразовании и обмерзании в зимний период года
Со временем снижается эффективность работы вследствие образования загрязнений	Эффективность работы постоянна весь период эксплуатации
Имеет типовые габаритные размеры	Может быть приспособлена к любому размеру

Охлаждение воды в установке происходит за счет тепломассообмена на высокоразвитой поверхности контакта водяных капель и воздуха, который подается в установку за счет эффекта эжекции (рис. 3).



Рисунок 2. – Эжекционная форсунка



Рисунок 3. – Принцип работы эжекционной форсунки

Эффект эжекции создается потоком водяных капель, исходящим под давлением из эжекционных форсунок, разбрызгивающие сопла которых направлены внутрь корпуса градирни, в специальные каналы эжекционных модулей, установленных внутри градирни. Сплошной водовоздушный поток перекрывает эжекционный канал и затягивает за собой с большой скоростью значительный объем воздуха.

Эжекционная градирня обладает возможностью эффективного регулирования ее теплосъема. Чем выше давление воды на соплах, тем мельче капля и выше скорость ее вылета. Соответственно, увеличивается эффект эжекции и тем самым осуществляется больший захват эжектируемого воздуха. Кроме того, мелкая капля при одном и том же объеме воды имеет большую поверхность контакта с воздухом, чем крупная, что вместе с повышенной подачей воздуха приводит к увеличению тепломассообмена.

Корпус градирни (рис. 4) выполняется в виде одного или нескольких модулей, каждый из которых имеет один вертикальный эжекционный канал и один горизонтальный. Углы раскрытия каналов соответствуют максимальному коэффициенту эжекции при работе совместно с эжекционно-струйными форсунками. Напорные коллекторы эжекционных контуров вынесены за пределы воздуховодных окон и размещены таким образом, чтобы улучшить условия входа воздуха. В процессе работы корпус градирни служит только для направления водовоздушных потоков. Охлажденная вода из корпусов сразу стекает в соответствующую секцию накопителя.

Замена каплеуловителя при переоборудовании позволит снизить сопротивление воздуха на выходе из градирни, увеличив тем самым скорость воздуха на выходе, что повысит эффективность работы градирни. Применение современных каплеуловителей позволяет снизить унос капель до минимума (эффективность каплеулавливания 99,9%), что сократит объем подпиточной воды и исключит обледенение градирни в зимний период (устойчивы к резким перепадам температур).

Рассмотрим пример реконструкции водоблока завода «Полимир». Прежде всего, произведем энергетическую оценку электрических машин, входящих в водооборотные циклы (ВОЦ).

Оценка потребления электроэнергии водооборотными циклами Завода «Полимир» ОАО «Нафтан» приведена на рисунке 5. В таблице 2 представлены типы и характеристики градирен и насосов, входящих в водооборотные циклы.

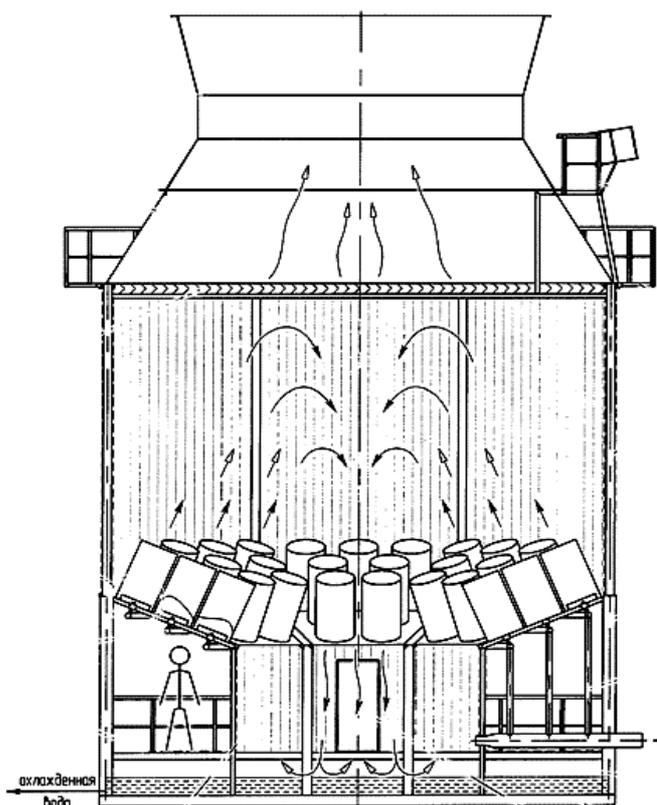


Рисунок 4. – Схема модернизированной эжекционной градирни

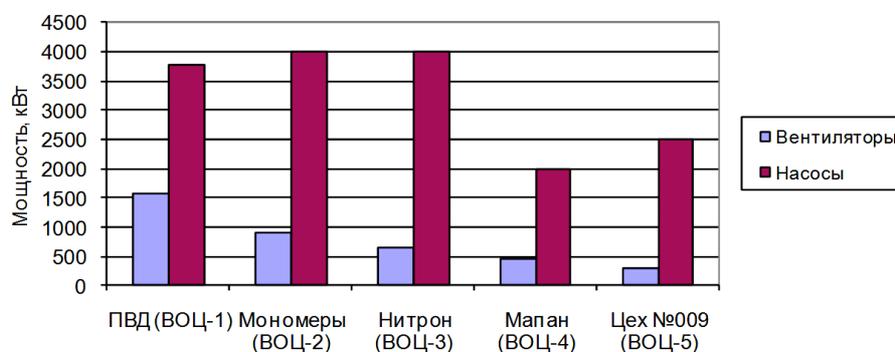


Рисунок 5. – Оценка потребления электроэнергии вентиляторами и насосами градирен производств Завода «Полимир» ОАО «Нафтан»

Как видно из диаграммы, доля электроэнергии, потребляемая вентиляторами, составляет примерно 20% от суммарного количества, используемого водоблоками завода «Полимир». Поэтому эконо-

мически целесообразно по мере износа и выхода из строя вентиляторных градирен производить их замену на эжекционные. Следует отметить, что в настоящее время производство «Нитрон» не функционирует, но имеются градирни, которые могут быть модернизированы и использованы во время пиковых нагрузок на градирни в жаркие дни летом.

Вместе с тем на водоблоках завода «Полимир» производится стабилизационная обработка воды реагентами по программе, предписанной фирмой «Налко», включающей в себя ингибирование коррозии, добавление медного купороса, хлорирование, микробиологическую обработку и другие ее виды, что требует дополнительных затрат на реагенты. В эжекционных градирнях можно уменьшить использование данных реагентов, так как эжекторы неприхотливы к качеству воды, а в случае забивания механическими примесями легко очищаются.

Таблица 2. – Градирни и насосы, входящие в водоблок завода «Полимир»

Градирни	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Мощность, кВт	Производство	Насосы	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Давление Р, МПа	Мощность, кВт
СК-400	2905000	4000	160	Полиэтилен высокого давления (ВОЦ-1)	22НДС	3600	0,52	630
СК-400	2905000	4000	160		22НДС	3600	0,52	630
ВГ-В	2700000	2500	250		22НДС	3600	0,52	630
ВГ-В	2700000	2500	250		22НДС	3600	0,52	630
ВГ-В	2700000	2500	250		22НДС	3600	0,52	630
ВГ-В	2700000	2500	250		22НДС	3600	0,52	630
ВГ-В	2700000	2500	250		22НДС	3600	0,52	630
Сумма			1570	Сумма				3780
СК-400	2905000	4000	160	Мономеры (ВОЦ-2)	20НДС	3420	0,71	800
ВГ-В	2700000	2500	250		20НДС	3420	0,71	800
ВГ-В	2700000	2500	250		20НДС	3420	0,71	800
ВГ-В	2700000	2500	250		20НДС	3420	0,71	800
ВГ-В	2700000	2500	250		20НДС	3420	0,71	800
Сумма			910	Сумма				4000
СК-400	2905000	4000	160	Нитрон (ВОЦ-3)	20НДС	3420	0,71	800
СК-400	2905000	4000	160		20НДС	3420	0,71	800
СК-400	2905000	4000	160		20НДС	3420	0,71	800
СК-400	2905000	4000	160		20НДС	3420	0,71	800
СК-400	2905000	4000	160		20НДС	3420	0,71	800
Сумма			640	Сумма				4000
2ВГ-70	1100000	1000	75	Мапан, Воск (ВОЦ-4)	Д2500/62	2500	0,62	500
2ВГ-70	1100000	1000	75		Д2500/62	2500	0,62	500
2ВГ-70	1100000	1000	75		Д2500/62	2500	0,62	500
2ВГ-70	1100000	1000	75		300Д90	1260	0,54	250
2ВГ-70	1100000	1000	75		300Д90	1260	0,54	250
2ВГ-70	1100000	1000	75		300Д90	1260	0,54	250
Сумма			450	Сумма				2000
2ВГ-70	1100000	1000	75	Цех № 009 (ВОЦ-5)	Д2500/62	2000	0,34	250
2ВГ-70	1100000	1000	75		Д2500/62	2000	0,34	250
2ВГ-70	1100000	1000	75		Д2500/62	2000	0,34	250
2ВГ-70	1100000	1000	75		Д2500/62	2000	0,34	250
Эжекционные	1100000	1000	75		Д2500/62	2000	0,34	250
Сумма			300	Сумма				1250
Сумма выражена в денежном эквиваленте на дату проведения исследования.								

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- создание безвентиляторной градирни позволяет значительно сократить эксплуатационные затраты;
- в конструкции градирни нет подвижных элементов, подверженных обледенению, что делает ее наиболее пригодной к эксплуатации в зимнее время по сравнению с вентиляторными градирнями;
- незначительное образование льда на стенках корпуса в зоне воздухоподводящих окон не препятствует нормальной эксплуатации градирни;
- использование эжекционных градирен на заводе «Полимир» позволит сэкономить более 3,5 МВт электроэнергии, не нарушая основных технологических режимов работы установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М. : Энергоатомиздат, 1998.
2. Гладков, В.А. Вентиляторные градирни / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко. – М. : Стройиздат, 1976.
3. Галустов, В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике / В.С. Галустов. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
4. Гончаров, В.В. Брызгальные водоохладители ТЭЦ и АЭС / В.В. Гончаров. – Л. : Энергоатомиздат, 1989.
5. Курганов, А.М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения : справочник / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л. : Стройиздат, 1986.
6. Сафронова, Е.В. Проблемы, возникающие при эксплуатации градирен промышленными предприятиями г. Новополюцка / Е.В. Сафронова, А.В. Спиридонов // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., 25–26 нояб. 2015 г. ; УО «ВГТУ». – Витебск. – С. 305–307.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ooo-nt.ru>. – Дата доступа: 15.11.2016.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.evromash.ru/articles/gradirni-ventilyatornye-17-article.html>. – Дата доступа: 15.11.2016.

*Поступила 26.12.2016*

#### IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF COOLING TOWERS THE PLANT “POLYMIR” OF JSC “NAFTAN”

*A. SPIRIDONOV, E. SAFRONOVA*

*The paper provides a comparative analysis of the ejection fan and cooling towers and their advantages. The features of the work of ejectors in cooling towers, the possibility of reconstruction of the existing fan coolers are considered. Energy efficiency rating when using ejection of cooling towers is produced. It is shown that the existing cooling towers can be converted into the ejection, the body remains of the old tower, changing the body paneling, as necessary, repaired bearing structures, installed collector ejection nozzles. Those reconstruction can be carried out with little capital expenditure.*

**Keywords:** *cooling tower, energy efficiency, reconstruction, chillers, ejector.*

УДК 628.33

**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЗОННОЙ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД  
ОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ****Т.С. КУПРИЯНЧИК***(Завод «Полимир» ОАО «Нафтан»);***А.В. ГАЛУЗО***(Витебскводоканал);***канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО***(Полоцкий государственный университет)*

*Исследуется проблема использования биотехнологии нитри-денитрификации и биологической дефосфотации на очистных сооружениях. Подобрана технологическая схема биологической очистки. Разработана модельная установка для проведения статических экспериментов. Отработана методика исследований, проведения опытов; выполнен анализ полученных результатов. В итоге проведенного исследования достигнута эффективная очистка от органических веществ, получены данные по сокращению расхода воздуха на аэрацию сточных вод и уменьшению количества образующегося избыточного ила.*

**Ключевые слова:** биогенные элементы, сточные воды, биохимическая очистка, избыточный ил.

Глубокое удаление азота и фосфора из сточных вод становится одной из основных задач на уже существующих сооружениях канализации, так как сооружения запроектированы и построены в то время, когда загрязнение водоемов биогенными элементами еще не было таким интенсивным. В настоящее время сооружения канализации, работающие по технологической схеме 1970–80-х годов (рассчитанной на удаление БПК и взвешенных веществ), не справляются с задачей глубокого удаления биогенных элементов азота и фосфора. В зависимости от объема поступления и характеристик сточных вод очистные сооружения неоднократно перестраивались, реконструировались и расширялись. Реконструкция сооружений биологической очистки, в частности аэротенка, выгодна и в экономическом плане, так как стоимость доочистки 1 м<sup>3</sup> сточных вод на дополнительных сооружениях в 1,5...2 раза выше, чем сама очистка, а удельные затраты возрастают в 20...50 раз [1; 2].

**Объект исследований, выбор технологической схемы.** В качестве объекта исследования рассматривается станция аэрации «Витебскводоканал» и реальная сточная вода, отбираемая в различных точках по технологической схеме ее обработки. В состав сооружений биологической очистки входят аэротенки-вытеснители, работающие в режиме нитрификации, и вторичные отстойники. Установлено, что традиционная однозонная система биохимической очистки в аэротенках, позволяет изъять основную массу органических веществ, но не может обеспечить достаточную глубину удаления соединений азота и фосфора. Без изменения технологической схемы эффективность удаления соединений азота и фосфора составляет 10...30%, что не позволяет обеспечить нормативы предельно допустимого сброса в Западную Двину [3].

В аэротенке, работающем в режиме нитрификации, происходит последовательное двухстадийное окисление (сначала углерода, а затем азота). Этот процесс обусловлен условиями существования бактерий-нитрификаторов. На стадиях окисления углерода они ингибированы и включаются в активную деятельность после резкого снижения БПК<sub>5</sub> [1; 2; 4; 5]. Только при проведении биологической обработки сточных вод с различными зонами по аэробности возможно достичь максимально эффективного удаления биогенных элементов.

В настоящее время на станции аэрации города Витебска решается вопрос о замене четырех коридорных аэротенков на более совершенные сооружения по биохимической очистке сточных вод. Предполагается их реконструкция с применением биотехнологии с сочетанием аэробных и анаэробных зон. При этом качество очищенной сточной воды по содержанию азота и фосфора будет удовлетворять самым жестким требованиям на сброс для водоемов Республики Беларусь [6]. Данная биотехнология позволит удалить соединения азота и фосфора из смеси биологических и промышленных сточных вод на очистных сооружениях города Витебска. Предлагается ее реализация с созданием в аэротенке трех зон:

- *аэробной* (высокая концентрация растворенного кислорода), где протекают процессы аэробной очистки от органических веществ, нитрификации (биоокисления аммонийного азота до нитратного) и дефосфотации (быстрое потребление фосфатов фосфорными бактериями);

- *аноксидной* (растворенный кислород практически отсутствует, но есть нитраты, а также органические вещества), где происходит процесс денитрификации;

- *анаэробной* (нет растворенного кислорода, нитратов и нитритов, но есть органические вещества), где идет сбраживание органических веществ до ацетата, который потребляется фосфорными бактериями с выделением в среду фосфатов.

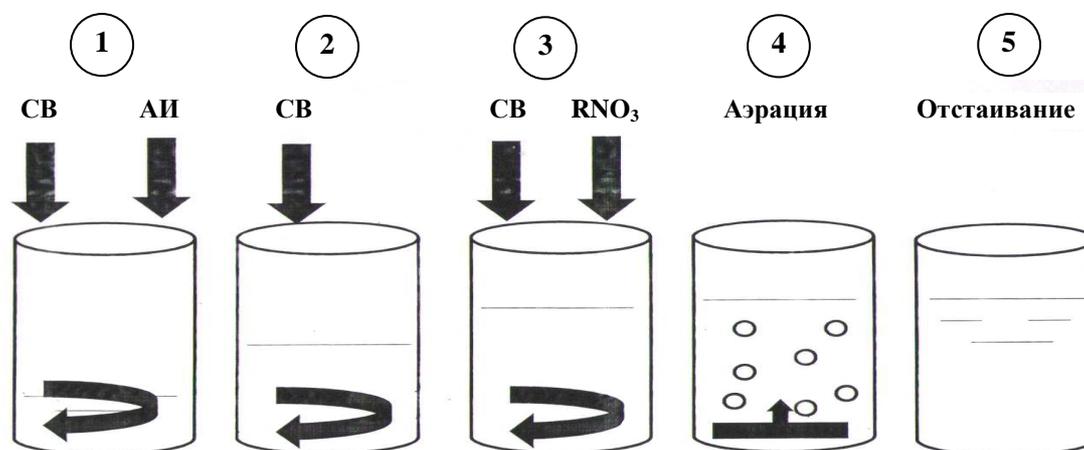
С этой целью на станции аэрации «Витебскводоканал» были проведены экспериментальные исследования на статической модельной установке по подбору эффективной технологической схемы с режимами нитри-денитрификации и биологической дефосфотации сточных вод.

**Методика проведения исследований.** Модельная установка представляет собой стальную емкость диаметром 1 м, высотой 1,9 м и рабочим объемом по сточной воде 1,2 м<sup>3</sup>.

Обеспечение технологических режимов обработки сточных вод с различной интенсивностью аэрации обеспечивалось мешалкой с редуктором и шестью дисковыми аэраторами диаметром 200 мм.

Стадии обработки сточных вод представлены на рисунке 1. Основу технологии очистки сточных вод составила трехзонная схема их анаэробно-аноксидно-оксидной обработки [7] с двумя перекачками иловой смеси: первая – из вторичного отстойника в предденитрификатор (стадии 5–1), вторая – из конца оксидной зоны в аноксидную (стадии 4–3). Для повышения эффективности обработки в анаэробной зоне использовался предденитрификатор.

В емкость модельной установки подавалась иловая смесь (стадии № 1), в которую при перемешивании с использованием мешалки добавлялась часть сточной воды (стадия № 2), снова перемешивалась уже с добавлением нитратосодержащей иловой смеси (стадия № 3). После окончания первых трех стадий данная смесь подвергалась аэрационной нитрификации (стадия № 4). Конечным процессом обработки сточных вод является вторичное отстаивание (стадия № 5), при этом часть активного ила из отстойника направлялась опять на предденитрофикацию.



1 – предденитрификация; 2 – анаэробная зона;  
3 – денитрификация; 4 – нитрификация; 5 – отстаивание

Рисунок 1. – Стадии обработки сточной воды в модельной установке

Сущность биологических процессов заключалась в следующем. На *стадии № 1* происходит восстановление нитратов. Предварительная денитрификация возвратного ила более эффективно протекает при впуске части сточных вод, аэрация смеси не производилась, использовалась мешалка.

Анаэробная часть (*стадия № 2*) является реактором кислого брожения, в котором при отсутствии нитратов и растворенного кислорода часть микроорганизмов ила продуцирует из загрязнений сточных вод органические кислоты. Количество кислот может быть отражено содержанием летучих кислот жирного ряда. Наличие летучих жирных кислот способствует вытеснению фосфатов из клеток ила [1; 7]. Аэрация смеси отсутствовала, в работе находилась только мешалка для перемешивания иловой смеси.

Скорость денитрификации в аноксидной части (*стадия № 3*), в первую очередь, зависит от наличия легкоокисляемого органического субстрата в виде БПК<sub>5</sub>, затем – от концентрации нитратов, степени рециркуляции нитратосодержащего потока, отсутствия растворенного кислорода. Работает мешалка.

Процесс нитрификации (*стадия № 4*) рассматривается как двухстадийный процесс. Нитрификаторы окисляют аммонийный азот до нитритов, затем до нитратов, при этом производилась аэрация сточных вод посредством дисковых аэраторов.

При проведении эксперимента в модельной установке решались следующие задачи по стадийной обработке воды:

- изучить в лабораторных условиях закономерности удаления загрязнений из сточных вод биологическим методом;
- подобрать соответствующую технологическую схему биологической очистки для сточных вод города Витебска, определить необходимые технологические параметры (объемы зон, время обработки и др.).

В ходе эксперимента отбирались пробы сточной воды, осветленной, очищенной и отстаиванной воды, а также образцы ила. В воде определялись следующие показатели: температура, рН, БПК<sub>5</sub>, ХПК, аммонийная группа, фосфор общий, взвешенные вещества. В иловой смеси определялись показатели: содержание кислорода, концентрация ила по массе, концентрация ила по объему. При этом измерение температуры, рН и объема ила производилось непосредственно у экспериментальной емкости. План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1. – План проведения эксперимента по биохимической очистке сточных вод при удалении биогенных элементов

№	Место отбора	Примечание
1	Исходная сточная вода из приемной камеры станции аэрации	–
2	Сточная вода после 1-го отстойника (осветленная)	Отбор до начала эксперимента
3	Нитратная иловая смесь	То же
4	Иловая смесь из бочки: t = 0 мин	Смешивание осветленной воды и нитратной иловой смеси – 1 мин с включением мешалки и отбором пробы
5	t = 30 мин	
6	t = 60 мин	
7	t = 90 мин	
8	t = 120 мин	
9	Сточная вода после 1-го отстойника (осветленная)	Отбор пробы
10	Иловая смесь из бочки: t = 0 мин	После добавления воды 1 мин перемешивание и отбор пробы
11	t = 30 мин	
12	t = 60 мин	
13	t = 90 мин	
14	t = 130 мин	
15	Сточная вода после 1-го отстойника (осветленная)	Отбор пробы
16	Нитратная иловая смесь	Отбор пробы
17	Иловая смесь из бочки: t = 0 мин	Смешивание осветленной воды и нитратной иловой смеси – 1 мин с включением мешалки и отбором пробы
18	t = 15 мин	
19	t = 30 мин	
20	t = 45 мин	
21	t = 60 мин	
22	t = 90 мин	
23	Аэрация: t = 30 мин	Включение аэрации и первый отбор через 30 мин
24	t = 60 мин	
25	t = 90 мин	
26	t = 120 мин	
27	t = 150 мин	
28	Отстаивание: t = 30 мин	Выключение аэрации, проведение отстаивания с отбором пробы через 30 мин
29	t = 60 мин	
30	t = 90 мин	
31	t = 120 мин	

Наблюдения за процессами в ходе эксперимента выявили типичные для данной технологии явления. В предденитрификаторе происходило восстановление нитратов и снижение содержания БПК, в анаэробной зоне – выделение фосфатов из ила, в денитрификаторе – снижение количества нитратов, а в нитрификаторе – окисление азота аммонийного с интенсивным извлечением фосфатов из воды активным илом.

Анализируя полученные данные (рис. 2), можно сделать вывод, что в бескислородных зонах аэротенка (стадии 1–2) микроорганизмы потребляют легкоокисляемые органические вещества за счет энергии, которая образуется в их клетках при разрыве полифосфатных связей с выделением в жидкую фазу ортофосфатов. В результате этой биохимической реакции произошло увеличение количества фосфора общего с 2,96 до 11,85 мг/дм<sup>3</sup>.

Концентрация фосфора в зонах денитрификации и нитрификации снижается до 10,85 мг/дм<sup>3</sup> и 1,3 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Это происходит вследствие того, что в анаэробных и аэробных условиях органическое вещество окисляется кислородом или нитратом и выделенная энергия используется бактериями для поглощения ортофосфата из водной среды. Далее происходит преобразование ортофосфата в полифосфат, который откладывается в клетках бактерий в виде гранул и необходим для повторения цикла потребления субстрата – летучих жирных кислот (ЛЖК) и роста биомассы [1]. Превышение количества потребленных фосфатов над количеством фосфатов, выделяемых в анаэробных условиях, объясняется приростом биомассы.

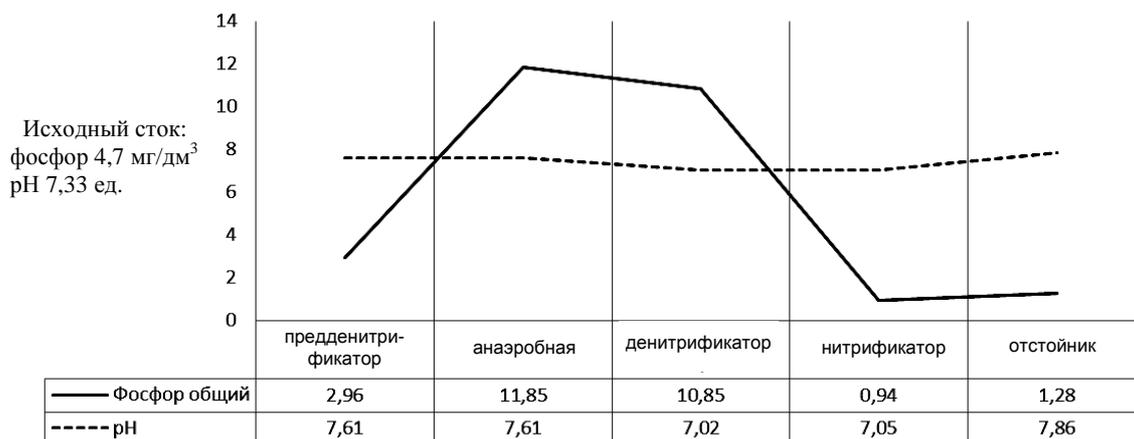


Рисунок 2. – Изменение содержания фосфора общего и pH среды в ходе эксперимента

В анаэробной зоне происходит ферментивное разложение части органического вещества загрязнений с образованием субстрата – ЛЖК, необходимых для проведения процесса дефосфотации и восстановления азота. В нитрификаторе далее протекают процессы окисления углерода, а затем – нитрификация. Данные по этим процессам отображены на рисунке 3.

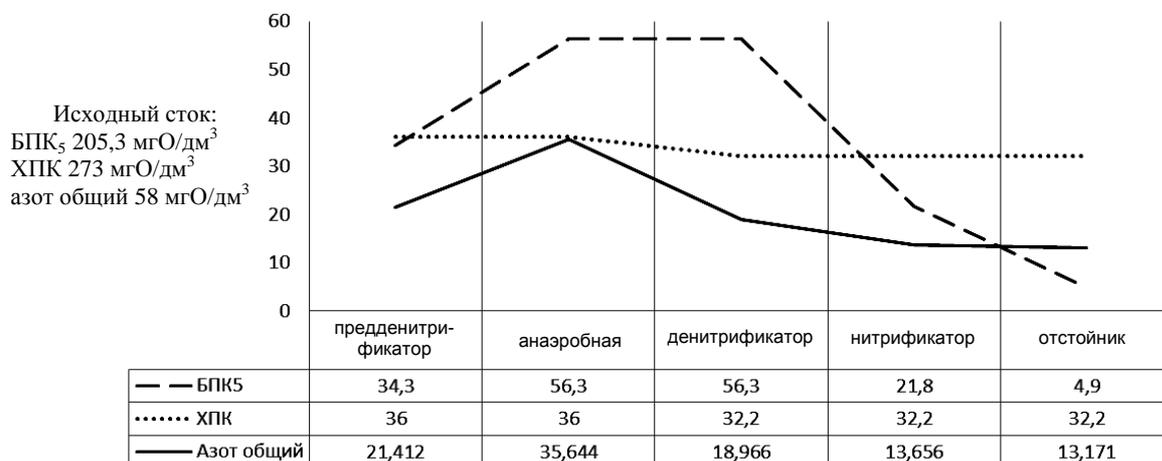


Рисунок 3. – Изменение содержания БПК<sub>5</sub>, ХПК и азота общего в ходе эксперимента

Процесс нитрификации рассматривают как двухстадийный процесс, осуществляемый группами хемоавтотрофных бактерий. Нитрификаторы окисляют аммонийный азот до нитритов и затем до нитратов. Из всех кислородсодержащих соединений нитриты и нитраты используются для дыхания микроорганизмов как наиболее доступные при отсутствии кислорода или его низкой концентрации [2; 8].

Как видно из рисунка 3, концентрация азота общего изменилась в ходе эксперимента с 58 мг/дм<sup>3</sup> до 13,6, что свидетельствует об эффективных процессах окисления – восстановления азотных соединений с выводом избыточного азота в атмосферу.

Снижение БПК<sub>5</sub> в ходе эксперимента составило 97,6% (4,9 мгО/дм<sup>3</sup> после вторичного отстойника), ХПК – 88,2% (32,2 мгО/дм<sup>3</sup> после вторичного отстойника).

Таким образом, в заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- полученные в ходе исследования данные соответствуют требованиям ТКП 17.06-08-2012 [6];
- для достижения рекомендаций ХЕЛКОМ [3] по содержанию фосфора необходима реагентная доочистка, так как биохимическим способом невозможно достичь концентрации фосфора общего менее 1 мг/дм<sup>3</sup>, прежде всего из-за влияния на состав сточных вод промышленных предприятий города; вместе с тем достигнута эффективная очистка от органических веществ;
- получены данные по сокращению расхода воздуха на аэрацию сточных вод и уменьшению количества образующегося избыточного ила.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск : Континент, 2011.
2. Технология удаления азота и фосфора в процессах очистки сточных вод / Б.Г. Мишуков [и др.]. – СПб. : Изд-во журн. «Вода: технология и экология», 2008.
3. Ющенко, В.Д. Анализ работы сооружений для удаления соединений фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска / В.Д. Ющенко А.В. Галузо, Т.С. Куприянчик // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 115–119.
4. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод в сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М. : Акварос, 2003.
5. Удаление азота и фосфора на канализационных очистных сооружениях / А.Н. Беляев [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 9.
6. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод : ТКП 17.06-08-2012 (02120). – Минск : РУП ЦНИИКИВР, 2012.
7. Куприянчик, Т.С. Экспериментальные исследования технологии «Денифо» на пилотной установке / Т.С. Куприянчик, Ю.П. Седлухо // Сб. науч. тр. 1-й Восточноевропейской региональной конф. молодых ученых и специалистов водного сектора, Минск, 21–22 мая 2009 г. – Минск, 2009.
8. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце [и др.]. – М. : Мир, 2009.

Поступила 15.12.2016

#### APPLICATION OF MULTI-ZONE BIOCHEMICAL WASTEWATER TREATMENT FROM BIOGENIC ELEMENTS

**T. KUPRIYANCHIK, A. GALUZO, V. YUSHCHENKO**

*The problem of the use of biotechnology of nitride nitrification and biological dephosphatization in treatment plants is being investigated. The technological scheme of biological treatment is selected. A model installation for conducting static experiments has been developed. The technique of research, conducting experiments has been worked out. The results obtained are analyzed. As a result of the study, effective purification from organic substances was achieved, data were obtained to reduce air consumption for aeration of waste water and reduce the amount of excess sludge formed.*

**Keywords:** biogenic elements, sewage, biochemical treatment, excess sludge.

УДК 658.382.3:622.831.322

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ****В.А. ИСКРА; канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЁНОК  
(Полоцкий государственный университет)**

*Рассматривается проблема общего шумового загрязнения окружающей среды от открыто расположенных обвязок трубопроводов. Проведен анализ литературных источников и исследований по заявленной теме. Установлены источники шума. Описан существующий комплекс средств и мероприятий по снижению шума. На основе результатов анализа литературы выявлены адекватные физико-математические модели: для описания и расчета вибрации трубопроводов, в том числе с учетом влияния вибропоглощающего покрытия на снижение вибрации; для расчета звукоизолирующих свойств стенок трубопровода и защитных звукоизолирующих кожухов с учетом применения вибро- и звукопоглощающих покрытий; для расчета звукоизлучения отдельных элементов трубопровода и всей обвязки трубопроводов в целом с учетом направленности излучения.*

**Ключевые слова:** шумовое загрязнение, вибропоглощающие покрытия, звукоизолирующие конструкции, источники шумоизлучения, снижение шума, обвязка трубопроводов.

Общее шумовое загрязнение окружающей среды от открыто расположенных обвязок трубопроводов (например, на выходе компрессорной станции) часто имеет недопустимо высокую интенсивность. Так, уровни шума на рабочих местах обслуживающего персонала, обеспечивающих функционирование систем трубопроводов, при допустимом уровне 80 дБА достигают 100...110 дБА [1]. Это, безусловно, является не только вредным для его здоровья фактором, но и препятствует жилой застройке в окрестном районе, поскольку для достижения на территориях, примыкающих к жилым зданиям, уровня, не превышающего санитарных норм, потребовалось бы отнести эти здания от обвязки трубопроводов на расстояние не менее 1 км. Результаты замеров показывают, что в зависимости от частотной области уровень шума трубопроводов во многих случаях требуется понизить на 15...20 дБ.

Таким образом, борьба с шумом трубопроводов, используемых для перекачки природного газа, является актуальной научно-технической и экологической задачей.

Один из путей частичного решения поставленной задачи – полная конструктивная модернизация перепускных узлов обвязки трубопроводов и изменение режимов нагнетания газотопливных смесей с целью создания условий, исключающих сильную турбулизацию и пульсацию потока и обусловленные этим вибрацию и шумоизлучение стенок трубопроводов. Основным препятствием на пути данного способа решения задачи снижения шума являются чрезмерно высокие материальные затраты на разработку необходимого оборудования и переоборудование станций. Кроме того, само переоборудование потребовало бы остановки рабочих процессов и демонтажа обвязок трубопроводов, что нежелательно в технико-экономическом отношении.

Представляется, что наиболее эффективным в данном случае является метод снижения шумоизлучения трубопроводов при помощи вибропоглощающих и звукоизолирующих конструкций, применение которых не требует изменения существующей структуры трубопроводов [2]. Для этого необходимо разработать оптимальные методы расчета для прогнозирования шумоизлучения обвязки трубопроводов компрессорных станций, а также определить эффективность проектирования соответствующих звукоизолирующих и вибропоглощающих конструкций для обеспечения требуемого снижения уровня шума.

Изучение специальной литературы и анализ многолетних исследований, проводимых ВНИИГаз, позволил установить источники шума, выбрать оптимальные средства и мероприятия по снижению шума. Внедрение этих мероприятий обеспечило определенное снижение шума в рабочих помещениях и на территории компрессорной станции (КС) [3–5]. Основными источниками шума на территории КС и в жилых зонах являются воздухозаборные и выхлопные шахты газотурбинной установки, трубопроводы технологической обвязки нагнетателей. При этом общие уровни шума превышают допустимые по действующим санитарным нормам. Шум всасывания газотурбинной установки (ГТУ) обусловлен главным образом неоднородностью потока на входе в осевой компрессор и вихреобразованием, вызванным взаимодействием всасывающего потока с невозмущенной поверхностью всасывающего тракта. В окружающую среду шум всасывания проникает через стенки воздуховода и воздушный фильтр.

Шум выхлопа ГТУ обусловлен в основном вихреобразованием при взаимодействии движущегося потока со стенками выхлопной шахты и невозмущенной поверхностью окружающего воздуха вне пределов шахты. Он распространяется по выхлопному тракту и через стенки шахты выхлопа [3; 4]. Аэродинамический шум ГТУ проявляется в области средних и высоких частот (с максимумом в диапазоне частот 2000...8000 Гц); механический шум, вызванный дисбалансом ротора или шумом подшипников, проявля-

ется в низкочастотной области спектра [4]. Шум всасывания, обусловленный неоднородностью потока, может быть снижен путем конструктивных изменений осевого компрессора, разработки конструкций, обеспечивающих сверхзвуковой режим течения потока в канале. Для снижения вихревого шума используют глушители и звукопоглощающие облицовки. По конструкторской документации ВНИИГаз изготавливаются опытные образцы пластинчатых глушителей более совершенного (модульного) типа и облицовок технологической обвязки трубопроводов [3]. На всасывающие и нагнетательные патрубки в зале нагнетателей установлены кожухи; пространство между кожухом и трубопроводом заполнено звукопоглощающим материалом. Разработана звукоизолирующая конструкция для шахты всасывания в виде стенок из листовой стали, пространство между которыми заполнено матами из супертонкого базальтового волокна. Шум, излучаемый трубопроводами, обусловлен в основном распространяющимся шумом работающих компрессора и нагнетателя, а также вибрацией, вызванной турбулентностью потока [5]. При высокоскоростном потоке газа на шум существенно влияет пульсация давления в турбулентном пограничном слое, возбуждающая трубопровод. Этот шум проникает в окружающую среду через стенки трубопровода. Сумма компонент шума различного происхождения в значительной степени зависит от размеров, формы и толщины стенок трубопровода, а также от частотного диапазона. Наиболее рациональный способ снижения шума трубопроводов – увеличение звукоизолирующей способности, так как установка глушителей в трубопроводе не всегда возможна. Научным центром ВНИИГаз предложена шумовибропоглощающая конструкция, состоящая из трех слоев вибропоглощающей мастики, разделенных слоями мешковины, и металлического кожуха [4]. При этом рекомендуется производить засыпку трубопроводов землей. Внедрение подобных мероприятий обеспечивает снижение шума на территории КС на величину до 15 дБА [3]. Для разработки эффективных средств и способов снижения шума, излучаемого трубопроводами технологической обвязки нагнетателей КС, необходимо учитывать имеющиеся результаты исследований колебаний и излучения трубопроводов, звукоизоляции и демпфирования трубопроводов. В настоящее время при проектировании компрессорных станций рекомендуется предусматривать следующий комплекс мероприятий, обеспечивающих определенное снижение шума:

- облицовка газовоздушных трактов ГПА (газоперекачивающих агрегатов) звукопоглощающими и звукоизолирующими материалами;
- установка отражателей звука на всасывании и выхлопе ГПА;
- установка акустических кожухов на турбогруппу;
- акустическая обработка машинных залов и залов нагнетателей;
- применение акустических экранов в производственных помещениях и на территории КС;
- использование акустических ширм.

Для определения размеров санитарно-защитной зоны и оптимального расположения КС, выбора оптимальных средств шумоглушения разработана *методика расчета уровней шума*, учитывающая влияние внешних условий на распространение шума и особенности источников шума. Для разных типов источников шума ГПА получены данные по излучению звука в атмосферу, уровню звуковой мощности источников шума, наличию в спектре излучения дискретных составляющих, соответствию спектра излучения источников шума спектру шума в зоне жилой застройки, работе источников шума в ночное время. Однако данная методика не учитывает влияние направленности излучения шума трубопроводами на выбор расположения КС.

Для снижения шума трубопроводных систем с повышенной температурой предложен герметичный УДЭ (упругодемпфирующий элемент) [6]. Такой элемент хорошо воспринимает знакопеременные нагрузки, обладает высокой механической прочностью, износостойкостью, стабильностью жесткостных и диссипативных свойств в агрессивных средах в широком диапазоне температур. Герметичные УДЭ устанавливаются внутри трубопровода, чем достигается снижение собственной частоты пульсации давления в трубопроводе и уменьшение амплитуды резонансного пика. Величина изменения амплитудно-частотной характеристики трубопровода зависит не только от общей объемной сжимаемости пакета герметичных УДЭ, но и от места его расположения.

Эффективным средством снижения шума трубопроводов является их демпфирование. Оно обеспечивает увеличение пространственного затухания волн, распространяющихся по стенкам трубопроводов, и уменьшает пики амплитудно-частотных характеристик вибраций и шума трубопровода. Для демпфирования трубопроводов применяют три основных типа вибропоглощающих покрытий: жесткие, армированные и мягкие. В некоторых случаях (например, при высокой температуре поверхности трубопровода) в армированном покрытии используют также теплоизоляционный слой. Предложены покрытия с изменяющейся толщиной, с дискретным размещением и др. [7–9].

Для трубопроводов обвязки компрессорных станций характерно то, что толщина их стенок много меньше радиуса, в связи с этим они могут быть отнесены к классу цилиндрических оболочек, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться колебания и излучение звука цилиндрических оболочек. Известно, что на низких частотах колебания оболочек соответствуют колебаниям эквивалентных стержней, на вы-

соких частотах – колебаниям пластин с толщиной, равной толщине стенок труб, а на средних частотах – оболочечным модам колебаний. Колебаниям и излучению круговых цилиндрических оболочек посвящено большое количество работ. Для выбора методов расчета колебаний трубопроводов обвязки компрессорных станций рассмотрим только исследования, направленные на определение параметров собственных и вынужденных колебаний оболочек, звукового поля и излучаемой звуковой мощности.

*Теория оболочек* в настоящее время находит широкое применение в строительстве, судостроении, ракетостроении, авиации, газовой и нефтяной промышленности, а также в других областях техники, где используют тонкие круговые оболочки или трубопроводы. Большой интерес представляет определение собственных частот колебаний оболочек конечной длины. В отечественной и зарубежной печати опубликовано значительное количество работ, посвященных этому вопросу [10–21]. Задачу о свободных колебаниях цилиндрических оболочек рассматривали многие исследователи. Еще Рэлея получил приближенное выражение для собственных частот колебаний оболочки, имеющей круговую форму поперечного сечения, и рассмотрел ее колебания для случаев растяжения срединной плоскости и без растяжения. Однако полученные выражения записаны через константы, не принятые в современной теории упругости, и не удобны для использования.

В работах [10; 11] приведен наиболее полный обзор уравнений движения оболочек, в частности тонких круговых цилиндрических. Сравнение четырех способов определения собственных частот колебаний гладких оболочек с кольцевыми ребрами жесткости приведено в работе [12]: приближенного энергетического метода Рэлея – Ритца на основе работ [13–15]; приближенного метода конечных элементов [16]; точного метода Ферсберга [17; 18]; точного метода Варбургтона [19–21]. В результате расчетов по этим методам установлено: для тонкой, длинной цилиндрической оболочки имеется хорошее соответствие результатов, полученных по каждому из этих методов; метод Ритца дает большие погрешности для коротких оболочек при малых  $n$  ( $n$  – число волн, укладываемых по окружности оболочки), для больших  $n$  отличия результатов незначительны; для осесимметричных ( $n = 0$ ) и стержневых ( $n = 1$ ) форм колебаний жесткость ребер не сказывается на значениях частот, тогда как масса ребер, наоборот, влияет на эти значения, причем для данного случая результаты, полученные разными методами, хорошо совпадают.

**Заключение.** Из проведенного анализа литературных источников по демпфированию и звукоизоляции трубопроводов следует ряд выводов:

- эффективность демпфирующих покрытий трубопроводов зависит от частотного диапазона возбуждаемых колебаний, типа и расположения источников возбуждения, собственных частот колебаний трубопровода, наличия препятствий различного рода, являющихся причиной преобразования одного типа волн в другой;

- в зависимости от диапазона частот и геометрических характеристик трубопроводов более эффективными могут являться однородные либо армированные покрытия;

- существующие методы оценки эффективности вибропоглощающих покрытий не позволяют выполнять выбор и поиск оптимальных параметров покрытия при проектировании систем трубопроводов, основаны на рассмотрении отдельных частных случаев колебаний и излучения цилиндрических оболочек при гармоническом характере их возбуждения;

- эффективность нанесения покрытий на разветвленную систему трубопроводов не исследована;
- случаи комбинированного применения средств вибропоглощения и звукоизоляции изучены недостаточно полно;

- в настоящее время не существует законченного метода для расчета колебаний реальных систем трубопроводов типа обвязки компрессорных станций, позволяющего рассчитать вибрацию во всем диапазоне звуковых частот с учетом особенностей трассировки, сочленения трубопроводов и наличия на них неоднородностей (арматуры). При этом диапазон средних и высоких частот (более 200...400 Гц), в котором, как правило, наблюдаются наиболее интенсивные колебания трубопроводов обвязки компрессорных станций, наименее изучен.

Увеличение мощности современных газоперекачивающих агрегатов, повышение скорости и давления газовоздушных потоков сопровождается повышением уровней механического и аэродинамического шума. Все это обуславливает необходимость проведения дополнительных мероприятий по снижению шума на территории КС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кульбей, А.Г. Построение полей индивидуального риска для промышленных объектов / А.Г. Кульбей, А.И. Леонович // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. – № 8. – С. 89–95.
2. Техническое регулирование вопросов строительства и ремонта магистральных нефтепроводов / В.К. Липский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 85–88.

3. Терехов, А.Л. Исследование и снижение шума на компрессорных станциях магистральных газопроводов / А.Л. Терехов. – М. : ИРЦ Газпром, 2002.
4. Терехов, А.Л. Шум газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистральных газопроводов. – М. : ИРЦ Газпром, 2003.
5. Айрбабамян, С.А. Снижение шума компрессорных станций / С.А. Айрбабамян // Проблемы акустической экологии : сб. науч. ст. – Л. : Стройиздат, 1990. – С. 51–54.
6. Иванов, Л.Ю. Герметичный упругодемпфирующий элемент для снижения шума трубопроводных систем / Л.Ю. Иванов // Новые методы и средства звуко- и виброизоляции в промышленности и на транспорте : материалы краткосроч. семинара, Ленинград, 16–17 марта 1989 г. ; под ред. В.И. Попкова. – Л. : ЛДНТП, 1989. – С. 37–43.
7. Степанов, В.Б. Вибропоглощающее покрытие с изменяющейся толщиной / В.Б. Степанов, Б.Д. Тартаковский // Акустич. журн. – 1985. – Т. 31, вып. 6. – С. 775–780.
8. Регулируемое демпфирующее покрытие : а. с. SU № 597866 / В.В. Бабенко, Л.Ф. Козлов, В.И. Коробов. – Опубл. 1978.
9. Покрытие для демпфирования вибраций трубопроводов : а. с. SU № 721616 / Р.С. Зейнетдинова, Н.И. Наумкина, Б.Д. Тартаковский. – Опубл. 15.03.1980.
10. Donell, L.L. Beams, plates and shells / L.L. Donell. – New York : Me Graw-Hill, 1976. – 453 P.
11. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. – Л. : Судостроение, 1962. – 344 с.
12. Sharma, C.B. Free vibration of cantilever circular cylindrical shells a comparative study / C.B. Sharma, D.J. Johns // J. Sound Vib. – 1972. – V. 25, № 3. – P. 433–499.
13. Johns, D.J. Vibration studies of a ring stiffened circular cylindrical shell / D.J. Johns, R.J. Allwood // J. Sound Vib. – 1968. – V. 8, № 1. – P. 147–155.
14. Sharma, O.B. Vibration characteristics of a clamped-free and clamped-ring-stiffened circular cylindrical shell. / O.B. Sharma, D.J. Johns // J. Sound Vib. – 1971. – V. 14, № 4. – P. 459–474.
15. Sharma, C.B. Frequencies of clamped-free cylindrical shells (letter) / C.B. Sharma // J. Sound Vib. – 1973. – V. 30, № 4. – P. 525–528.
16. Al-Najafi, A.M. Free vibration of ring-stiffened cylindrical shells / A.M. Al-Najafi, G.B. Warburton // J. Sound Vib. – 1970. – V. 13, № 1. – P. 9–25.
17. Форсберг, К. Влияние граничных условий на характеристики форм колебаний цилиндрических оболочек / К. Форсберг // Ракетная техника и космонавтика ; рус. пер. АИАА. – 1964. – Т. 2, № 12. – С. 166–174.
18. Форсберг, К. Осесимметричные и балочного типа колебания тонкой, круговой цилиндрической оболочки / К. Форсберг // Ракетная техника и космонавтика ; рус. пер. АИАА. – 1969. – Т. 7, № 2. – С. 37–45.
19. Warburton, G.B. Vibration of thin cylindrical shells / G.B. Warburton // J. Mechanical Engineering Science. – 1965. – Т. 7, № 3. – 399 P.
20. Warburton, G.B. Natural frequencies of thin cantilever cylindrical shells / G.B. Warburton, J. Higgs // J. Sound Vib. – 1970. – V. 11, № 3. – P. 355–358.
21. Warburton, G.B. Comments on vibration studies of a ringstiffened circular cylindrical shell / G.B. Warburton // J. Sound Vib. – 1963. – V. 9, № 3. – P. 349–352.

Поступила 12.01.2017

## ANALYSIS OF THE METHODS OF REDUCING NOISE EMISSION OF THE MAIN SOURCES IN THE TERRITORY OF COMPRESSOR STATION

V. ISKRA, L. SPIRIDIONOK

*The article presents the problem of the general noise environmental pollution from openly located bindings of pipelines are presented in article. The analysis of literature and researches. Noise sources are established. The existing complex of means and actions for noise reduction is described. Also, taking into account results of the analysis of literature, adequate physics-mathematics models are briefly described: for the description and calculation of vibration of pipelines, including taking into account influence of a vibration-absorbing covering on decrease in vibration; for calculation of the soundproofing properties of walls of the pipeline and the protection soundproofing covers taking into account application vibro-and sound-absorbing coverings; for calculation of sound generation of separate elements of the pipeline and all binding of pipelines in general taking into account a radiation orientation.*

**Keywords:** *the noise pollution, a vibration-absorbing covering soundproofing designs, noise emissions origin, noise reduction, a binding of pipelines.*

УДК 331.451:613.6.027

## ФАКТОРЫ АПРИОРНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ДЛЯ РАБОТНИКОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

канд. техн. наук Ю.А. БУЛАВКА  
(Полоцкий государственный университет)

Проведена априорная оценка степени профессионального риска у работников белорусских нефтеперерабатывающих производств по гигиеническим критериям. Выявлен комплекс факторов условий труда и трудового процесса на современных объектах нефтепереработки: производственный шум; неблагоприятные параметры микроклимата; общая вибрация; воздействие вредных химических веществ на уровне, не превышающем предельно допустимых концентраций; тяжесть и напряженность трудового процесса. Показано, что условия труда по конкретным профессиональным группам характеризуются сочетанием ведущих вредных производственных факторов (в большинстве случаев постоянного широкополосного шума, тяжести и напряженности труда), интенсивность которых соответствует 3 классу 2–3 степени вредности. Наиболее высокому априорному профессиональному риску ущерба здоровью на уровне «труднопереносимого» подвержены операторы технологических установок, машинисты технологических насосов и компрессорных установок.

**Ключевые слова:** охрана труда, условия труда, нефтепереработка, профессиональный риск.

**Введение.** В Республике Беларусь проводится целенаправленная государственная политика в области охраны труда. Согласно официальным данным Национального статистического комитета [1] численность работников, занятых на рабочих местах с вредными и (или) опасными условиями труда, в последние годы уменьшается (данная закономерность проиллюстрирована рисунком 1), однако состояние условий и охраны труда на производстве продолжает оставаться сложной социально-экономической проблемой [2–11].



Рисунок 1. – Динамика численности работников, занятых на рабочих местах с вредными и (или) опасными условиями труда в Республике Беларусь

Процент работников, занятых в условиях, не отвечающих санитарно-гигиеническим требованиям и нормам в период с 2010 по 2015 год, колеблется в пределах от 20,55 до 22,61 от общей численности населения, занятого в экономике Республики Беларусь.

Из всех вредных произведенных факторов, оказывающих воздействие на занятое население Беларуси, выделяется эквивалентный уровень шумовой нагрузки. Производственный шум как фактор занимает лидирующую позицию в общей численности работающих в неблагоприятных условиях труда – в период с 2010 по 2015 год в пределах 37,14...43,37% от общего числа персонала, занятого на рабочих местах с вредными и (или) опасными условиями труда, что составляет более 350 тысяч работников. В целом численность мужчин, занятых в условиях повышенного уровня шума, на уровне выше предельно допустимого уровня (ПДУ), превышает численность женщин более чем в 3,5 раза.

Нефтеперерабатывающие предприятия в Беларуси являются важнейшими государственными объектами. Применяемые технологии в условиях сложившейся практики их эксплуатации характеризуются: непрерывностью технологических процессов; высокой степенью автоматизации и механизации работ; расположением технологического оборудования в основном на наружных установках (в производственных помещениях размещено преимущественно компрессорное и насосное оборудование); дистанционным управлением процессом, позволяющим уменьшить длительность контакта работников с вредными производственными факторами. Однако на предприятиях не всегда удается обеспечить оптимальные и допустимые условия труда, более 30% работников вынуждены трудиться на вредном производстве [7].

Отсутствие достаточных гигиенических данных о факторах априорного профессионального риска для работников белорусских нефтеперерабатывающих производств с учетом современных социально-экономических условий определили актуальность данной работы.

Анализ показателей априорного профессионального риска и комплексная гигиеническая оценка условий труда работников наиболее мощного по количеству перерабатываемого сырья белорусского нефтеперерабатывающего предприятия с характеристикой факторов производственной среды и трудового процесса и является целью исследования.

**Материал и методы исследований.** Представляемые сведения были подготовлены на основании статистически достоверных фактических данных регулярных, специально организованных исследований и наблюдений производственной среды для аттестации рабочих мест по условиям труда работников исследуемого нефтеперерабатывающего предприятия.

Для комплексной гигиенической оценки условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса для работников нефтеперерабатывающих производств использованы:

- *критерии и подходы*, заложенные в Санитарных нормах и Правилах «Гигиеническая классификация условий труда», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28 декабря 2012 г. № 211 (с изменениями, утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 6 декабря 2013 г. № 121, и с изменениями от 30 июня 2014 г. № 51, с дополнениями, утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 2 июля 2015 г. № 89);

- метод *априорного прогнозирования с качественной оценкой полученных результатов*, реализуемый на основе изменения класса условий труда, с учетом дифференцированных по степени превышения нормативов уровней производственных факторов и концепции вероятностных порогов их воздействия, характерных для каждого класса условий труда с оценкой по гигиенической классификации.

Комплексная гигиеническая оценка условий труда выполнялась для одиннадцати производственных подразделений нефтеперерабатывающего предприятия с общей численностью работающих 4009 человек, при этом обследовано 2138 рабочих мест.

В исследовании использованы современные методы гигиенической оценки условий труда, изложенные в Инструкции «Критерии оценки и показатели производственно обусловленной заболеваемости для комплексного анализа влияния условий труда на состояние здоровья работников, оценки профессионального риска» [12].

**Результаты и их обсуждение.** Анализ исследований и наблюдений производственной среды, проводимых для целей аттестации рабочих мест по условиям труда, показал, что работники НПЗ подвергаются постоянному воздействию химического фактора малой интенсивности (на уровне ниже предельно допустимых концентраций), которое усугубляется значительной шумовой нагрузкой, выраженными факторами напряженности и тяжести труда.

Обобщенные показатели гигиенической оценки условий труда работников исследуемого нефтеперерабатывающего предприятия с учетом дифференцированных по степени превышения нормативов уровней производственных факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Обобщенные показатели оценки условий труда

Производственный фактор	Показатели оценки условий труда			
	процент от количества работников / количества рабочих мест с классом условий труда			
	оптимальный и допустимый		вредный	
	1 и 2	3.1	3.2	3.3
	пренебрежимо малый (переносимый) риск	малый (умеренный) риск	средний (существенный) риск	высокий (труднопереносимый) риск
Химический	97,48/97,75*	2,02/2,01	0,50/0,23	–
Пыли, аэрозоли	99,78/99,58	0,15/0,28	0,02/0,05	0,05/0,09
Шум	17,96/21,95	20,86/25,60	60,80/52,08	0,37/0,37
Инфразвук	98,03/97,71	1,85/2,06	0,12/0,23	–
Вибрация общая	93,74/95,55	6,21/4,35	0,05/0,09	–
Электромагнитные излучения	98,68/97,85	1,32/2,15	–	–
Микроклимат	86,63/88,21	13,27/11,61	0,10/0,19	–
Освещение	100,00/100,00	–	–	–
Аэроионизация	99,75/99,91	0,25/0,09	–	–
Тяжесть труда	35,00/38,18	25,57/31,96	39,42/29,85	–
Напряженность труда	86,65/85,59	3,94/5,52	9,41/8,89	–
Общая оценка условий труда	2,89/3,79	16,74/19,47	47,98/59,38	32,39/17,36
*значение определено по количеству работников/по количеству рабочих мест (коэффициент соответствия рабочих мест типовым).				

Следует отметить, что при общей гигиенической оценке условия труда по степени вредности и опасности подразделяются на классы:

- 3 класс 1 степень вредности – возможны функциональные изменения в организме работника, которые восстанавливаются, как правило, при более длительном, чем к началу следующей смены, прерывании контакта с вредными факторами, и увеличивается риск повреждения здоровья;

- 3 класс 2 степень вредности возможны стойкие функциональные изменения, приводящие в большинстве случаев к росту показателей временной нетрудоспособности, повышению уровня заболеваемости, прежде всего к болезням, которые отражают состояние наиболее уязвимых органов и систем для данных вредных факторов, появление начальных признаков профессиональных заболеваний, возникающих после продолжительной экспозиции (15 и более лет);

- 3 класс 3 степень вредности возможно развитие, как правило, профессиональных болезней легкой и средней степеней тяжести с потерей профессиональной трудоспособности, рост хронической производственно обусловленной патологии, повышенные уровни заболеваемости с временной нетрудоспособностью.

При изучении условий труда выявлено, что на работников предприятий нефтеперерабатывающей отрасли оказывают влияние следующие факторы априорного профессионального риска:

#### 1. Химический (вредные вещества) – при воздействии:

а) предельных углеводородов на уровне ниже ПДК трудятся 85,41% исследуемых работников (78,44% рабочих мест), а сливщики-разливщики и товарные операторы (0,83% работников, или 0,42% рабочих мест) товарно-сырьевого цеха работают в условиях превышения допустимых концентраций по предельным углеводородам (класс условий труда 3.1) и, как следствие, подвергаются умеренному априорному риску;

б) ароматических углеводородов на уровне ниже ПДК трудятся 40,46% работников (31,71% рабочих мест), а товарные операторы участка по грузовой работе товарно-сырьевого цеха (0,50% работников, или 0,23% рабочих мест) товарно-сырьевого цеха работают в условиях превышения допустимых концентраций по ароматическим углеводородам (класс условий труда 3.2) и, как следствие, подвергаются существенному априорному риску;

в) трудятся в условиях загрязнения воздуха рабочей зоны на уровне ниже ПДК: по сероводороду (30,81% работников); оксиду углерода (18,88% работников); диоксиду азота (10,55% работников), фенолу (7,41% работников); аммиаку (5,59% работников); моноэтаноламину (4,89% работников); смеси аце-

тона и метилэтилкетона (4,69% работников); диоксиду серы (4,07% работников); аэрозолю минеральных масел (2,69% работников); оксиду железа (2,47% работников); щелочи (2,32% работников); озону (1,79% работников); сварочному марганцу (1,69% работников); сварочному аэрозолю (1,29% работников); серной кислоте (0,64% работников) и др. Регистрируются превышения ПДК (класс условий труда 3.1) по серной кислоте на установке получения серной кислоты (0,64% исследуемых работников, или 0,56% рабочих мест), по сварочному марганцу у электрогазосварщиков ремонтного производства (0,22% исследуемых работников, или 0,42% рабочих мест), по оксиду железа у электрогазосварщиков и газорезчиков ремонтного производства (0,27% исследуемых работников, или 0,51% рабочих мест);

г) в условиях повышенной запыленности трудятся шлифовщики, заточники и токари.

Таким образом, умеренному уровню риска от воздействия химического фактора подвергаются аппаратчики окисления установки получения серной кислоты, сливщики-разливщики и электрогазосварщики. Труднопереносимому уровню риска – товарный оператор участка по грузовой работе. Несмотря на то, что вредные вещества в большинстве случаев содержатся в воздухе рабочей зоны на уровне ниже ПДК, возможно проявление комбинированного действия этих веществ, а длительные химические воздействия малой интенсивности могут выступать в качестве условий, способствующих возникновению заболевания и ухудшающих их клиническое течение [2; 7].

## 2. Физические факторы:

а) труднопереносимому уровню риска по эквивалентной шумовой нагрузке подвержены машинисты блочной системы управления агрегатами когенерационной газотурбинной установки.

Как видно из таблицы 1, подвергаются существенному априорному риску по производственному шуму 60,80% работников производств НПЗ на рабочих местах, составляющих 52,08%; умеренному риску – 20,86% работников на 25,60% рабочих мест. К основному технологическому оборудованию, генерирующему при работе производственный шум высокого уровня звукового давления, можно отнести горелки и дымососы печей, насосное и компрессорное оборудование, аппараты воздушного охлаждения, срезы факельных труб, градирни, воздуходувки, запорно-регулирующую аппаратуру на магистралях пара и сжатого воздуха и др.;

б) работают в условиях воздействия повышенного уровня инфразвука водители автомобилей, трактористы, машинисты экскаватора и некоторые инженерно-технические работники;

в) общая вибрация на умеренно-существенном уровне оказывает воздействие на водителей строительной техники, некоторых операторов технологических установок АВТ, машинистов компрессорных установок и технологических насосов, локальная вибрация – на работающего на молотах и прессах;

г) повышенный уровень электромагнитного поля характерен для пользователей персональных компьютеров, в частности операторов технологических установки вакуумной разгонки мазута, а частотой 50 Гц для электромонтеров по ремонту и обслуживанию электрооборудования когенерационных газотурбинных электроустановок;

д) сварщики подвергаются умеренному уровню воздействия ультрафиолетового излучения;

е) неудовлетворительные микроклиматические условия обусловлены размещением значительной части технологического оборудования на открытых площадках либо выполнением работы в неотапливаемых помещениях;

ж) пониженное содержание аэроионов в воздухе рабочей зоны отмечено у операторов технологических установок на Висбрекинге;

## 3. Психфизиологические факторы – тяжесть и напряженность трудового процесса:

а) тяжесть труда для работников НПЗ на умеренно-существенном уровне в основном обусловлена неудобной рабочей позы (на корточках, в наклонном положении или в вынужденной позе);

б) выполнение производственных операций сопровождается выраженным нервно-эмоциональным напряжением (напряженность труда соответствует 3 классу 1 степени вредности у 3,94% работников, а 3 классу 2 степени у 9,41% работников), что обусловлено использованием в технологическом процессе пожаро- и взрывоопасных веществ, восприятием большого количества информации, сигналов с последующей комплексной оценкой и коррекцией действий, необходимостью принятия решения в условиях дефицита времени, степенью риска для собственной жизни и степенью ответственности за безопасность других лиц, большим числом производственных объектов одновременного наблюдения, а также трехсменной работой.

В таблице 2 представлено распределение классов условий труда в зависимости от профессии, специфичной для НПЗ. Наиболее высокому априорному профессиональному риску ущерба здоровью на уровне труднопереносимого подвержены 78,80% операторов технологических установок, 55,66% машинистов технологических насосов, 66,29% машинистов компрессорных установок.

Таблица 2. – Общий класс условий труда в зависимости от профессии

Профессии	Показатель оценки условий труда				Процент работников определенной профессии от общего числа (4009 человек)
	процент от количества работников по профессии с общим классом условий труда				
	оптимальный и допустимый	вредный			
		1 и 2	3.1	3.2	
переносимый	умеренный	существенный	труднопереносимый		
Оператор технологических установок	1,20	–	20,00	78,80	22,83
Слесарь по ремонту технологических установок	–	3,57	93,75	2,68	8,38
Машинист технологических насосов	–	2,75	41,59	55,66	8,16
Инженерно-технические работники	10,03	44,98	39,79	5,19	7,21
Оператор товарный	3,72	33,06	63,22	–	6,04
Лаборант химического анализа	–	96,28	0,92	5,50	4,69
Приборист	–	2,27	97,73	–	4,39
Машинист компрессорных установок	–	–	33,71	66,29	4,37
Сливщик-разливщик	–	11,11	88,89	–	2,02
Слесарь и наладчик по КИП и А	24,56	18,35	55,26	–	1,90
Сварщик	–	–	40,00	30,28	1,37

**Заключение.** Работники производственных подразделений нефтеперерабатывающего предприятия подвергаются сочетанному воздействию вредных факторов физической и химической природы, а трудовой процесс характеризуется определенным уровнем тяжести и напряженности.

В результате выполнения комплексной гигиенической оценки условий труда установлено:

- 97,11% работников заняты во вредных условиях труда 1–3 степени 3 класса, т.е. «умеренно-труднопереносимой» категории подозреваемого профессионального риска, который может вызывать развитие профессиональных и производственно обусловленных заболеваний;

- наиболее высокому подозреваемому профессиональному риску ущерба здоровью на уровне труднопереносимого подвержены операторы технологических установок, машинисты технологических насосов и компрессорных установок.

Ведущим фактором априорного профессионального риска является постоянный широкополосный шум, как правило, превышающий допустимый уровень до 15 дБА в сочетании с определенным уровнем тяжести и напряженности трудового процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труд и занятость в Республике Беларусь : статистич. сб. / ответств. за вып. И.В. Бондаренко ; Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь». – Минск, 2016. – 290 с.
2. Булавка, Ю.А. Оценка риска от воздействия вредных и опасных производственных факторов на состояние здоровья работающих нефтеперерабатывающего предприятия (на примере производства смазочных масел, битумов и присадок) : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / Ю.А. Булавка ; Полоц. гос. ун-т : Новополоцк, 2013. – 187 с.
3. Булавка, Ю.А. Интегральная гигиеническая оценка условий труда работников нефтеперерабатывающего предприятия / Ю.А. Булавка // Методологические проблемы изучения, оценки и регламентирования химического загрязнения окружающей среды и его влияние на здоровье населения : материалы пленума Науч. совета Рос. Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды, Москва, 17–18 дек. 2015 г. / под общ. ред. акад. РАМН Ю.А. Рахманина. – М. : ФГБУ «НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина» Минздрава России, 2015. – С. 75–76.
4. Булавка, Ю.А. Развитие комплексной оценки профессионального риска путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Гигиена и санитария. – 2013. – № 4. – С. 47–54.

5. Булавка, Ю.А. Аттестация рабочих мест по условиям труда как основная составляющая системы оценки профессиональных рисков / Ю.А. Булавка // Культура и безопасность в современном мире : материалы междисциплинар. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Москва, 5 июня 2013 г. / Акад. ГПС МЧС России ; редкол. : С.П. Храмцов [и др.]. – М., 2013. – С. 10–13.
6. Булавка, Ю.А. Совершенствование априорной оценки профессиональных рисков путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Проблемы техносферной безопасности – 2013 : материалы 2-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 9 апр. 2013 г. / Акад. ГПС МЧС России ; редкол.: М.В. Алешков [и др.]. – М., 2013. – С. 184–186.
7. Булавка, Ю.А. Гигиеническая характеристика условий труда на производстве смазочных масел и битумов / Ю.А. Булавка, П.А. Чеботарев // Здоровье и окружающая среда : сб. науч. тр. – Минск, 2011. – Вып. 18. – С. 3–8.
8. Булавка, Ю.А. Роль аттестации рабочих мест для оценки профессиональных рисков / Ю.А. Булавка, П.А. Чеботарев // Якість технологій та освіти : сб. науч. тр. – Харків, 2011. – № 2. – С. 71–75.
9. Булавка, Ю.А. Анализ влияния экологически неблагоприятных условий труда на состояние здоровья работников производства смазочных масел и битумов / Ю.А. Булавка // Актуальные вопросы антропологии. Вып. 9 / Ин-т истории НАН Беларуси. – Минск : Беларус. навука, 2014. – С. 349–360.
10. Булавка, Ю.А. Интегральный показатель условий труда как элемент прогнозирования состояния здоровья работников при воздействии произведенных факторов / Ю.А. Булавка // Проблемы оценки и прогнозирования состояния индивидуального и популяционного здоровья при воздействии факторов риска ; под общ. ред. д-ра мед. наук, проф. М.П. Захарченко. – СПб. : Кримас+, 2015. – С. 114–115.
11. Булавка, Ю.А. Комплексный критерий оценки условий труда как элемент прогнозирования состояния здоровья работников при воздействии произведенных факторов / Ю.А. Булавка // Современные методологические проблемы изучения, оценки и регламентирования факторов окружающей среды, влияющих на здоровье человека : материалы междунар. пленума Науч. совета Рос. Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды, Москва, 15–16 дек. 2016 г. / под общ. ред. акад. РАМН Ю.А. Рахманина. – М. : ФГБУ «НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина» Минздравсоцразвития Рос. Федерации, 2016. – С. 108.
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 06.02.2017

#### FACTORS OF PRIORI OCCUPATIONAL RISK FOR WORKERS OF OIL REFINERIES

YU. BULAUKA

*The results of the comprehensive assessment of working conditions for workers of Belarusian oil refineries are presented in the paper. It's revealed that the workers are exposed to the combined effects of occupational factors both physical and chemical nature, and the work processes is characterized by a certain level of heaviness and tensity. The harmful working conditions (Class 3, Degree 2–3) are formed in the most occupational groups where the workers are exposed to the combined occupational factors. First highest of occupational priori risk of injury at the level of “hardly” are subjected to the operators of technological installations, machinists process pumps and compressor plants.*

**Keywords:** health and safety, working conditions, oil refining, occupational risk.

УДК 66.013.8

## ВЛИЯНИЕ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЗАБОЛЕВАНИЙ РАБОЧИХ РАЗБОРОЧНО-ОЧИСТНЫХ УЧАСТКОВ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**В.А. ДРОНЧЕНКО**

*(Полоцкий государственный университет)*

*Исследуется проблема вредного влияния нефтесодержащих отходов на здоровье работников разборочно-очистных участков цехов по ремонту оборудования. Проанализированы случаи заболеваний с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания. Предложены пути улучшения ситуации. Установлено, что продолжительность заболеваний с временной утратой трудоспособности зависит от степени загрязнения воздуха на рабочих местах.*

**Ключевые слова:** нефтесодержащие отходы, вредное влияние, здоровье персонала, экология, геоэкология, утилизация.

**Введение.** В процессе труда на рабочих разборочно-очистного участка ремонтного предприятия воздействует ряд производственных факторов, вредная составляющая которых может проявиться в заболевании, снижении работоспособности или ухудшении здоровья. Вредные производственные факторы в зависимости от уровня и продолжительности воздействия могут стать опасными. Они, как правило, оказывают воздействие на организм человека на уровне малой интенсивности, но сочетание нескольких, даже очень слабых одновременно действующих факторов, может сделать риск заболевания более высоким.

На рабочих разборочно-очистного участка ремонтного предприятия вредное влияние оказывают нефтесодержащие отходы и отработавшие растворы технических моющих средств (ТМС). Проявления действия отдельных их компонентов многообразны. Лица, которые постоянно контактируют с данными веществами, чаще болеют общими заболеваниями, к которым относят острые респираторные заболевания, грипп, воспаление верхних дыхательных путей, расстройства органов пищеварения. У этих людей и процесс выздоровления идет дольше. При проведении медосмотров они чаще жалуются на усталость, раздражительность, бессонницу, отсутствие аппетита, боли в суставах и мышцах.

В воздушной среде на рабочих местах присутствуют продукты испарения нефтесодержащих отходов и растворов ТМС. Наибольшая доля летучих веществ состоит из углеводородов нефтяного происхождения [1–3]. Эти вещества обладают политропным действием на организм человека и животных, вызывая негативные изменения в центральной нервной, сердечнососудистой, эндокринной системах, оказывая неблагоприятное влияние на периферическую кровь, многие органы и ткани, нарушают течение обменных процессов сначала в энергетическом звене (углеводный и жировой обмен), затем в пластическом (белковый обмен). Последнее является одной из причин нарушений иммунной системы. Углеводороды обладают мембранотропным эффектом, который сопровождается изменением активности специфических ферментов [1].

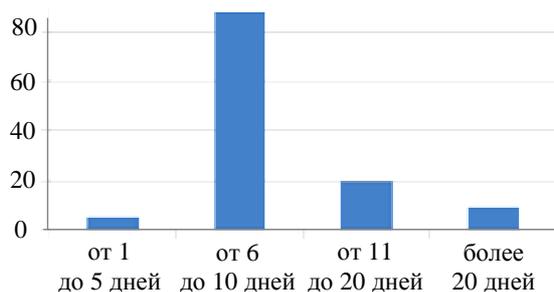
Следует отметить, что для большинства рабочих участка по разборке и очистке агрегатов характерна высокая напряженность трудового процесса, что, в свою очередь, усиливает процессы дыхания и кровообращения рабочих, способствующие поступлению вредных веществ в организм.

Снизить продолжительность заболеваний с временной утратой трудоспособности за счет ослабления вредного воздействия нефтесодержащих отходов на здоровье работников участков по разборке и очистке оборудования и машин и является целью данной работы.

**Основная часть.** Распределение числа случаев по продолжительности заболеваемости с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания (в пересчете на 100 работающих) представлено на рисунке 1 и в таблице 1. Среднегодовое количество заболеваемости с временной утратой трудоспособности составляет 121,68 случая, или 1208,65 дня.

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что общая средняя продолжительность заболевания за период с 2005 по 2009 год составляет 9,95 дней.

Согласно результатам проведенных исследований (табл. 3) 7,62% заболеваний продолжались более 20 дней, что составило 24,79% от общей временной утраты трудоспособности. Следует отметить, что 16,22% заболеваний продолжались от 11 до 20 дней, или 22,58% от общей временной утраты трудоспособности. Наибольшая доля в структуре заболеваний принадлежит заболеваниям с продолжительностью от 6 до 10 дней, или 72,21% с долей от общей продолжительности заболеваний 50,96%.



**Рисунок 1. – Распределение случаев заболеваний с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболеваний за период с 2005 по 2009 год в пересчете на 100 работающих**

Таблица 1. – Распределение числа случаев и дней заболеваемости с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания (в пересчете на 100 работающих)

Год	Продолжительность заболевания								Число случаев за год	Число дней за год
	1–5 дней		6–10 дней		11–20 дней		более 20 дней			
	число случаев	число дней	число случаев	число дней	число случаев	число дней	число случаев	число дней		
2005	2,22	8,89	99,32	612,14	16,58	249,23	9,06	348,38	127,18	1218,6
2006	5,99	24,44	91,79	621,03	17,95	230,26	9,91	306,67	125,64	1182,4
2007	6,15	26,32	85,98	614,53	20,17	260,51	10,60	272,82	122,91	1174,2
2008	4,10	17,61	82,39	675,21	22,91	316,75	6,67	250,43	116,07	1260,0
2009	5,64	23,93	79,83	556,92	21,03	307,52	10,09	319,66	116,58	1208,0
Всего за 5 лет	24,10	101,20	439,32	3079,83	98,63	1364,27	46,32	1498,00	608,38	6043,3
Среднегодовое значение	4,82	20,24	87,86	615,97	19,73	272,85	9,27	299,59	121,68	1208,7

Таблица 2. – Средняя продолжительность заболевания с временной утратой трудоспособности за период с 2005 по 2009 год (дней)

2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	Среднее значение за период
9,58	9,41	9,55	10,86	10,35	9,95

Таблица 3. – Структура случаев и дней заболеваемости с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания

Год	Продолжительность заболевания							
	1–5 дней		6–10 дней		11–20 дней		более 20 дней	
	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %
2005	1,75	0,73	78,09	50,23	13,04	20,45	7,12	28,59
2006	4,76	2,07	73,06	52,52	14,29	19,47	7,89	25,94
2007	5,01	2,24	69,96	52,34	16,41	22,19	8,62	23,23
2008	3,53	1,40	70,99	53,58	19,73	25,14	5,74	19,88
2009	4,84	1,98	68,48	46,10	18,04	25,46	8,65	26,46
Среднегодовое значение	3,96	1,67	72,21	50,96	16,21	22,58	7,61	24,79

При проведении исследований оценивалось гигиеническое состояние воздуха на рабочих местах участка по разборке и очистке ремонтируемых оборудования и машин. Для этого хроматографическим методом анализа (хроматограф мод. 3700) загрязняющих веществ определялось их содержание в воздухе рабочей зоны. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Сведения о вредных веществах в воздухе рабочей зоны

Вещества	Класс опасности	Содержание, мг/м <sup>3</sup>	Коэффициент приведения к третьему классу	Нормированные по ПДК концентрации
Масла минеральные (веретенное, машинное, цилиндрическое и др.)	3	0,0195	1,0	0,975
Углеводороды ароматические	2	0,0125	1,5	0,469
Углеводороды предельные алифатического ряда C <sub>1</sub> –C <sub>10</sub>	4	5,2000	0,8	0,416

После определения отношений фактического содержания отдельных загрязняющих веществ к предельно допустимым их концентрациям был рассчитан комплексный показатель  $P$  загрязнения воздуха рабочей зоны в виде индекса риска [4]:

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2},$$

где  $i = 1 \dots n$  – виды загрязняющих веществ;  $K_i$  – нормированные по ПДК концентрации веществ 1, 2, 4 классов опасности  $i$ -го вида, приведенные к таковой биологически эквивалентного 3-го класса опасности.

В результате расчета определено, что индекс риска здоровья работающих на участке разборки и очистки ремонтируемых агрегатов составляет 1,159. Используя сведения гигиенической оценки загрязнения воздуха комплексом загрязняющих веществ по среднесуточным концентрациям [4], установлено, что состояние воздушной среды на рабочих местах соответствует второй (II) степени загрязнения, что соответствует слабому неблагоприятному эффекту для здоровья рабочих. В этом случае требуется проведение мероприятий, направленных на приведение степени загрязнения воздуха к первой, которая является безопасной для здоровья работающих.

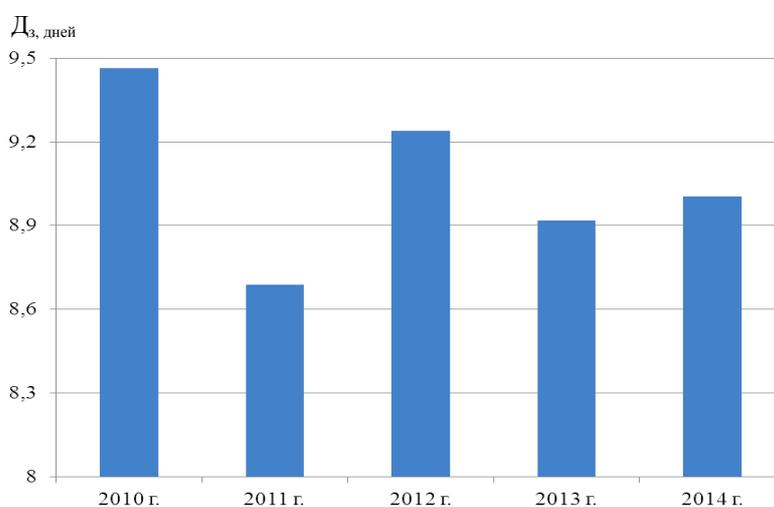
Сдерживающий фактор для проведения эффективных мероприятий – большие капитальные вложения в производство для приобретения оборудования и внедрения процессов комплексной переработки и утилизации нефтесодержащих отходов и отработавших водных растворов ТМС. Часто предприятия с целью утилизации отработавших нефтесодержащих продуктов сжигают их в специальных установках. При этом нерационально используется топливо. Альтернативным решением проблемы предлагаются методы утилизации отработавших нефтепродуктов, которые при этом могут быть стать потенциальным источником получения дохода в качестве вторичного материального ресурса.

В Полоцком государственном университете проводятся исследования с целью *разработки технологии приготовления мелкодисперсной эмульсии, обладающей высокой стабильностью, из нефтесодержащих отходов и отработавших растворов ТМС* под воздействием ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем [5–10]. Для проведения исследований создана установка для приготовления эмульсии, включающая приемный и расходный баки, насос и рабочую емкость с пневматическим излучателем. В установке используется ударно-волновой способ эмульгирования, который позволяет проводить обработку нерастворимых друг в друге жидкостей. Эмульгирование основано на создании в среде смешиваемых жидкостей низкочастотных ударных волн, под действием которых происходит разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей. Излучатель производит выхлопы сжатого воздуха с частотой, зависящей от расхода воздуха. При выхлопе сжатого воздуха в жидкость на глубине 0,5...0,8 м от поверхности образуется воздушная полость, которая при всплывании резко расширяется и совершает до четырех пульсаций. Затем происходит схлопывание воздушного пузыря в эмульгируемой среде с давлением на фронте воздушной полости, превышающим в 2,5...3,0 раза давление воздуха в излучателе вследствие несжимаемости жидкости. В результате получается мелкодисперсная эмульсия типа «вода в масле», обладающая высокой стабильностью.

Полученная эмульсия может заменить товарные продукты для смазки форм при производстве железобетонных изделий или использоваться как добавка к топливу для котельных установок, позволяя экономить основное топливо на 3...5% и снизить выбросы оксидов азота на 28...45% [5–10]. Использо-

зование установки обеспечило снижение в воздухе рабочей зоны содержания масел минеральных в 1,2 раза, а углеводородов предельных алифатического ряда  $C_1-C_{10}$  – в 1,1 раза, при этом комплексный показатель  $P$  загрязнения воздуха рабочей зоны в виде индекса риска оказался равным 0,977, что соответствует первой (I) степени загрязнения воздуха на рабочем месте. Эта степень соответствует допустимой степени загрязнения воздуха и является безопасной для здоровья работающих.

В результате внедрения предложенного способа утилизации нефтесодержащих отходов и отработавших водных растворов ТМС средняя продолжительность заболевания за период с 2010 по 2014 год составила 9,06 дня (рис. 2), что на 8,94% меньше, чем за период с 2004 по 2009 год (см. табл. 2). Общее число случаев временной потери трудоспособности уменьшилось на 7,59%, а общая продолжительность временной потери трудоспособности – на 18,15% (табл. 5). Изменилась структура продолжительности заболеваемости (табл. 6) по сравнению с таким же промежутком времени до внедрения технологии (см. табл. 3). Прослеживается тенденция уменьшения продолжительности заболеваемости. Так, доля случаев заболевания с продолжительностью более 20 дней за период с 2010 по 2014 год уменьшилась на 24,15% по сравнению с периодом с 2004 по 2009 год. Также уменьшилась доля случаев заболевания с продолжительностью от 11 до 20 дней.



**Рисунок 2. – Изменение средней продолжительности заболеваний с временной утратой трудоспособности за период с 2010 по 2014 год**

Улучшение условий труда было достигнуто за счет снижения объемов накапливаемых нефтесодержащих отходов и отработавших водных растворов ТМС в зоне рабочих мест, цехах и на территории предприятия путем перевода этих отходов в состояние, исключающее или снижающее угрозу здоровью работающих, а также в результате приготовления на основе этих веществ эмульсии и последующего использования ее как самим предприятием, так и другими предприятиями в качестве товарного продукта.

**Таблица 5. – Распределение числа случаев и дней заболеваемости с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания (в пересчете на 100 работающих)**

Год	Продолжительность заболевания								Число случаев за год	Число дней за год
	1–5 дней		6–10 дней		11–20 дней		более 20 дней			
	число случаев	число дней	число случаев	число дней	число случаев	число дней	число случаев	число дней		
2010	6,67	28,72	85,30	588,21	19,49	255,21	7,86	256,92	119,32	1129,1
2011	4,79	16,24	95,56	605,47	16,92	208,72	9,06	267,01	126,33	1097,4
2012	3,93	12,65	84,44	540,51	20,68	255,21	6,32	257,78	115,39	1066,2
2013	6,32	24,27	75,56	542,05	16,07	214,70	5,47	141,20	103,42	922,2
2014	5,81	16,75	70,94	517,61	17,27	240,17	3,76	105,81	97,78	880,3
Всего за 5 лет	27,52	98,63	411,79	2793,84	90,43	1174,02	32,48	1028,72	562,22	5095,2
Среднегодовое значение	5,50	19,73	82,36	558,77	18,09	234,80	6,50	205,74	112,44	1019,0

Таблица 6. – Структура случаев и дней заболеваемости с временной утратой трудоспособности по продолжительности заболевания

Год	Продолжительность заболевания							
	1–5 дней		6–10 дней		11–20 дней		более 20 дней	
	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %	структура случаев, %	структура дней, %
2010	5,59	2,54	71,49	52,10	16,33	22,60	6,59	22,76
2011	3,79	1,48	75,64	55,17	13,40	19,02	7,17	24,33
2012	3,41	1,19	73,19	50,70	17,93	23,94	5,48	24,18
2013	6,12	2,63	73,06	58,78	15,54	23,28	5,29	15,31
2014	5,94	1,90	72,55	58,80	17,66	27,28	3,85	12,02
Среднегодовое значение	4,90	1,94	73,24	54,83	16,08	23,04	5,78	20,19

**Заключение.** В результате проведения мероприятий, включающих внедрение технологий приготовления и последующего использования мелкодисперсной эмульсии на основе нефтесодержащих отходов и отработавших ТМС, достигнуто уменьшение степени загрязнения воздуха на рабочих местах разборки и очистки ремонтируемых оборудования и машин до допустимой, что, в свою очередь, способствует уменьшению числа и продолжительности заболеваний с временной утратой трудоспособности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.П. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов / В.П. Иванов, В.А. Дронченко. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 248 с.
2. Чеботарев, П.А. Охрана атмосферного воздуха от загрязнения углеводородами нефтяного генеза и оценка риска их влияния на состояние здоровья населения / П.А. Чеботарев. – Барановичи : Укрупн. тип., 2005. – 152 с.
3. Булавка, Ю.А. Анализ заболеваемости с временной нетрудоспособностью работников производств смазочных масел, битумов и присадок / Ю.А. Булавка, П.А. Чеботарев // Здоровье и окружающая среда : сб. науч. тр. – Минск, 2012. – Вып. 20. – С. 29–36.
4. Инструкция по применению методики оценки риска здоровью населения факторов среды обитания : утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 18.06.12. – Минск : Респ. центр науч.-практ. гигиены, 2012. – 23 с.
5. Иванов, В.П. Обоснование технических решений, связанных с охраной труда и окружающей среды / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 169–173.
6. Приготовление эмульсий на основе отработавших пластичных смазок / В.П. Иванов [и др.] // Проблемы трибології. – 2016. – Т. 80, № 2. – С. 63–68.
7. Дронченко, В.А. Использование отработавших нефтесодержащих продуктов при производстве железобетонных изделий / В.А. Дронченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 2015. – С. 231–232.
8. Иванов, В.П. Защита окружающей среды от отработавших водных растворов технических моющих средств / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 160–165.
9. Семенов, В.И. Снижение выбросов оксидов азота при работе котельных установок / В.И. Семенов, В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 186–190.
10. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.

Поступила 03.02.2017

#### EFFECTS OF OILY WASTE ON THE DURATION OF THE DISEASES OF WORKERS DISMANTLING AND TREATMENT SITES OF REPAIR PRODUCTION

V. DRONCHENKO

*The problem of the harmful effects of oily waste on the health of workers dismantling and treatment sites workshops on repair of the equipment is analyzed. The cases of diseases with temporary disability for the duration of the disease are explored. Ways to improve the situation are suggested. It is established that the duration of diseases with temporary disability depends on the degree of air pollution in the workplace.*

**Keywords:** oily waste, the harmful effects, health of staff, ecology, geo-ecology, recycling.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Частная методика создания способов формообразующей обработки в машиностроении .....	2
<i>Капитальян И.А., Орукари Б.</i> Шероховатость и волнистость поверхностей деталей, обработанных на двухсуппортных токарных станках с числовым программным управлением .....	9
<i>Микосянчик О.А., Ляшенко Б.А., Кузин Н.О., Дудан А.В.</i> Выбор оптимальных параметров структуры поверхностных слоев трибосистем с учетом градиента механических свойств .....	16
<i>Попок Н.Н., Портянко С.А., Максимчук А.С.</i> Совершенствование конструкций блочно-модульных торцовых фрез на основе исследования характеристик процесса резания .....	22
<i>Харжевский В.А.</i> Области существования двухкривошипных восьмизвенных механизмов с выстоем выходного звена на основе точек распрямления 5-го порядка .....	29
<i>Агеев М.А., Вигерина Т.В., Даныко К.А., Довжук С.А., Чиграй С.Л., Лопата А.В.</i> Оценка влияния параметров процесса газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования .....	35
<i>Попок Н.Н., Черневич М.В., Гвоздь Г.И.</i> Модель и алгоритм проектирования блочно-модульных режущих инструментов .....	41
<i>Рустамов А.П., Смиловенко О.О.</i> Экспериментальная модель процесса резания при проведении аварийно-спасательных работ алмазными кругами на модифицированной связке .....	49
<i>Попок Н.Н., Латушкин Д.Г., Махаринский Ю.Е., Путеев Н.В.</i> Моделирование влияния технологических факторов на точность зубчатых колес при зубошлифовании .....	55
<i>Балтиков Д.Ф.</i> Показатели работы энергетического комплекса с газогенераторной установкой .....	60

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

<i>Капский Д.В., Навой Д.В.</i> Создание интеллектуальной транспортной системы крупнейших городов .....	66
<i>Кузьменко В.Н., Мозалевский Д.В., Коржова А.В., Полховская А.С., Ермакова Н.С., Киселевич Н.В., Горелик Е.Н., Гамульский И.К.</i> Оценка эффективности транспортного обслуживания района жилой застройки в городе Минске .....	76
<i>Жорник В.И., Белоцерковский М.А., Ялович А.П., Дудан А.В.</i> Выбор состава приработочной композиции и определение режимов трибомеханической обработки стальных газотермических покрытий .....	85
<i>Фруцкий В.А., Вигерина Т.В., Кострицкий В.В.</i> Восстановление деталей типа «вал» путем комбинированного воздействия на материал покрытия .....	92
<i>Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Трусов Д.И., Ялович А.П., Дудан А.В.</i> Особенности восстановления деталей методами металлизации с использованием композиционных порошковых проволок .....	97

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОХРАНА ТРУДА

<i>Зильберглейт М.А., Якубовский С.Ф.</i> Идентификация пород древесины с использованием цветометрических характеристик .....	105
<i>Спирidonov А.В., Сафронова Е.В., Урванцев В.В.</i> Математическая модель для определения вероятной температуры паров пирометрическим методом .....	110
<i>Галузо А.В., Ющенко В.Д.</i> Влияние гидролиза сырого осадка на дефосфотацию сточных вод .....	116
<i>Спирidonov А.В., Сафронова Е.В.</i> Повышение энергоэффективности градирен Завода «Полимир» ОАО «Нафтан» ....	120
<i>Куприяничик Т.С., Галузо А.В., Ющенко В.Д.</i> Применение многозонной биохимической очистки сточных вод от биогенных элементов .....	126
<i>Искра В.А., Спирidonov Л.М.</i> Анализ методов снижения шумоизлучения основных источников на территории компрессорных станций .....	131
<i>Булавка Ю.А.</i> Факторы априорного профессионального риска для работников нефтеперерабатывающих производств .....	135
<i>Дронченко В.А.</i> Влияние нефтесодержащих отходов на продолжительность заболеваний рабочих разборочно-очистных участков ремонтного производства .....	141