

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

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



---

---

ВЕСНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСИТЭТА  
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, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

---

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химической техники и технологии.

---

---

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

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

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

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 *Т.А. Дарьянова.*

Подписано к печати 06.04.2020. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 12,33. Тираж 100 экз. Заказ 228.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

### ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКО-КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ УНИВЕРСАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

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

*Предлагается использование функционального проектирования в методике разработки кинематико-компоновочных схем универсальных металлорежущих станков. Функциональное проектирование рассматривается как синтез частных кинематических структур металлорежущих станков по закону функционирования, задаваемому соответствующим способом формообразующей обработки; кинематико-компоновочная схема универсального станка – как объединение частных структурных схем. Функциональное проектирование основано на современной университетской парадигме познания станочного оборудования, базирующейся на теории образования реальных поверхностей, теории кинематической структуры и теории настройки металлорежущих станков.*

**Ключевые слова:** функциональное проектирование, этапы проектирования, способы формообразующей обработки, разработка частных структурных схем станков, обобщенная кинематико-компоновочная структура универсального металлорежущего станка.

**Введение.** Современная университетская методика изучения станочного оборудования основана на парадигме познания, базирующейся на фундаментальных положениях теоретической механики: законе разветвления механической энергии в кинематических цепях и принципе возможных перемещений, известном в кинематике как принцип Даламбера. Эта парадигма [1] включает логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей в машиностроении и понятие о способе формообразующей обработки [2], а также понятие о кинематической структуре, функции и настройке металлорежущих станков [3].

В учебной литературе, в т.ч. в фундаментальном учебнике для вузов [4] по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», фундаментальные понятия университетской парадигмы познания станочного оборудования представляются как уже известные технические решения. Такой обезличенный подход не стимулирует творческое мышление при познании виртуальных технических решений (способов формообразующей обработки) и соответствующих им реальных технических решений (кинематической или кинематико-компоновочной, структуры металлорежущих станков), являющихся объектами интеллектуальной собственности, защищаемыми патентами на изобретения и полезные модели. Данное явление, по существу, является противоречием между современной методикой изучения станочного оборудования и парадигмой его познания. Это противоречие устраняется посредством включения функционального проектирования в методику изучения станочного оборудования [5].

Практическая составляющая названной выше парадигмы познания включает синтез кинематических или кинематико-компоновочных структурных схем металлорежущих станков. Синтез – это функциональное проектирование технического объекта или по заданному функциональному назначению, или по закону его функционирования, задаваемому соответствующим способом или группой способов формообразующей обработки. Первый вариант характерен для традиционного проектирования от достигнутого уровня развития станочного оборудования. Такое проектирование используется, как правило, при модернизации устаревших моделей станков. На современном этапе познания станочного оборудования предпочтителен второй, инновационный, вариант. В этом случае функциональное проектирование пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, т.к. позволяет проследить путь создания, или «изобретения», кинематической или кинематико-компоновочной структурной схемы металлорежущего станка, при определенных условиях защищаемого патентом [6].

Процесс функционального проектирования носит итерационный характер, т.е. от этапа к этапу – от анализа соответствующего способа или группы способов формообразующей обработки последовательно к решению поставленной задачи.

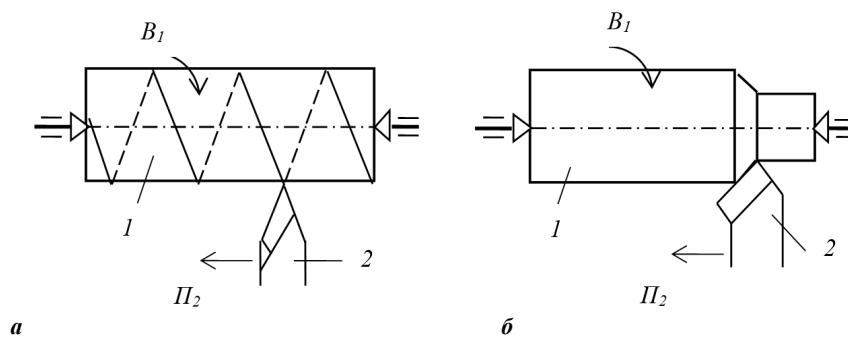
**Основная часть.** Металлорежущие станки общего назначения, или универсальные, – это объединение нескольких частных кинематических структур, каждая из которых реализует вполне определенный способ формообразующей обработки. Рассмотрим последовательность этапов функционального проектирования на примерах разработки частных структурных схем станков токарной технологической

группы и объединим их в обобщенную кинематико-компоновочную схему универсального токарно-винторезного станка.

На *первом этапе* анализируем способы формообразующей обработки, подлежащие реализации в частных кинематических структурах станка. При этом в первую очередь устанавливаем формообразующие движения, а затем движения деления, врезания и вспомогательных перемещений.

На рисунке 1, *а* показана схема пионерного способа нарезания резьбы фасонным резцом. Характеристический образ фасонного резца  $\{E\}_1$  [2]. По этой схеме заготовке 1, определенной образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2, профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы, – поступательное движение  $P_2$ , согласованное с движением  $B_1$  заготовки. Класс образования резьбы (винтовой поверхности) «копирование + след» [2]. Причем сложное исполнительное движение  $\Phi_v(B_1P_2)$ , состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений (вращательного  $B_1$  и поступательного  $P_2$ ), воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна содержать только одну сложную формообразующую кинематическую группу  $\Phi_v(B_1P_2)$ .

На рисунке 1, *б* приведена схема пионерного способа механической обработки цилиндрической поверхности острозаточенным резцом. Характеристический образ острозаточенного резца  $\{1\}_1$ . По этой схеме заготовке 1, ориентированной в пространстве так же, как в предыдущей схеме, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное движение  $P_2$ . Класс образования поверхности «двойной след» [2]. При этом элементарное движение  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую геометрической поверхности (окружность), а элементарное движение  $\Phi_s(P_2)$  – направляющую (прямую линию, параллельную оси заготовки). Следовательно, частная токарная структура станка должна содержать две простые формообразующие группы:  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(P_2)$ .



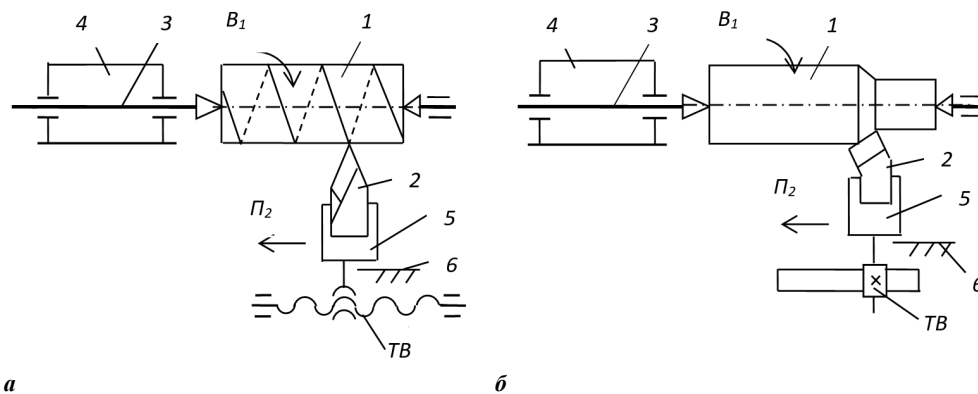
*а* – нарезание резьбы; *б* – точение цилиндрической поверхности

**Рисунок 1. – Схемы способов формообразующей обработки**

Для обоих рассматриваемых способов формообразующей обработки характерно одинаковое относительное положение траекторий движений  $B_1$  и  $P_2$ . Одинаково также абсолютное геометрическое положение взаимодействующих объектов – заготовки и инструмента – в горизонтальной плоскости. На этом основании устанавливаем технологическую компоновку обеих проектируемых частных кинематических структур, или расположение исполнительных органов (подвижных блоков). Такими органами являются блок шпинделя (передняя бабка), несущий заготовку, и инструментальный блок (суппорт), несущий резец.

На *втором этапе* осуществляем графическое оформление (рисунок 2) исполнительных органов (подвижных блоков).

Для проектируемых структурных схем исполнительные органы, несущие заготовку 1 и резец 2, конструктивно одинаковы и, следовательно, взаимозаменяемы. Исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3, смонтированный с возможностью вращения  $B_1$  в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2, – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом (кадеткой), смонтированным с возможностью поступательного перемещения по направляющим 6 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (ТВ). По сложившейся традиции в токарно-винторезных станках с механическими связями в частной кинематической структуре для нарезания резьбы (рисунок 2, *а*) в качестве ТВ используют передачу винт–гайка. А в частной кинематической структуре для точения цилиндрической поверхности (рисунок 2, *б*) в качестве ТВ – передачу зубчатое колесо–рейка. В современных токарно-винторезных станках с ЧПУ в обоих названных структурах используют общую передачу винт–гайка с телами качения.



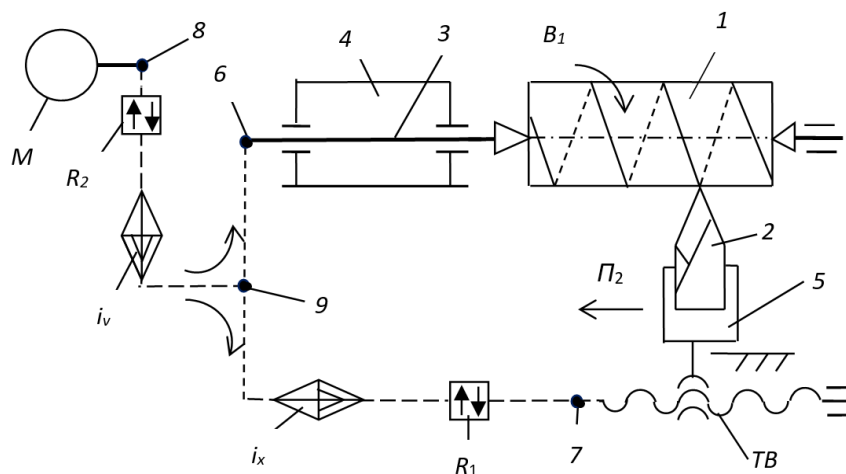
**а** – для нарезания резьбы; **б** – для точения цилиндрической поверхности

**Рисунок 2. – Исполнительные органы структурных схем**

На *третьем этапе* решаем вопрос о количестве источников механической энергии, выполняем графическое оформление связей между источниками механической энергии и исполнительными органами, устанавливаем органы настройки параметров исполнительных движений.

Для создания траектории сложного исполнительного движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , воспроизводящего на заготовке *1* направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы (рисунок 3), соединяем шпиндель *3*, смонтированный в подшипниках передней бабки *4*, с кареткой *5*, несущей резец *2*, посредством внутренней кинематической связи в виде штриховой линии *6–7*. Эта связь, состоящая из последовательно соединенных передач, накладывает ограничение на шпиндель *3* и каретку *5*, не позволяющие им занимать произвольные положения относительно друг друга и иметь произвольные скорости. Данная связь (структурная или кинематическая цепь) создает потенциальную возможность винтового движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ . Для реализации этой возможности соединяем произвольное промежуточное звено *9* внутренней связи *6–7* с электродвигателем *М* (внешняя кинематическая связь *8–9*).

При включении электродвигателя энергия движения по внешней связи *8–9* будет сообщаться через звено *9* во внутреннюю связь *6–7*. Это вызовет вращение  $V_1$  шпинделя, несущего заготовку, и продольное перемещение  $\Pi_2$  каретки, несущей резец. В итоге характеристический образ резца будет совершать относительно заготовки винтовое движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ . При этом соотношение элементарных движений  $V_1$  и  $\Pi_2$  зависит только от произведения передаточных отношений передач, образующих внутреннюю связь *6–7*. Таким образом, внутренняя связь сложной винторезной кинематической группы при функционировании имитирует передачу винт–гайка. Скорость этой имитации (темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности) зависит только от скорости звена соединения связей *9*, являющегося конечным звеном внешней связи. Это правило характерно для любой формообразующей группы.



**Рисунок 3. – Частная структурная схема станка для нарезания резьбы**

Сложное винтовое движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  имеет незамкнутую траекторию. Следовательно, оно должно настраиваться по всем пяти параметрам [1]. Для этого во внутреннюю связь установим два органа настройки  $i_x$  и  $R_1$ . Посредством первого из них настраивают шаг нарезаемой резьбы, а посредством вто-

рого – возможность нарезания левой или правой резьбы. Во внешней связи установим орган настройки на скорость  $i_v$ , воспроизведения направляющей и технологический реверс  $R_2$ , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке в исходное положение или при задании направления нарезания резьбы к передней бабке или от нее.

Расположение звена соединения связей 9 имеет принципиальное значение и зависит от расчетной цепи для органа настройки  $i_v$ . Элементарные движения  $B_1$  и  $P_2$ , образующие сложное винтовое движение  $\Phi_v(B_1P_2)$ , всегда одновременны и одинаковы по продолжительности. Это позволяет оценивать скорость сложного исполнительного движения через скорость одного из входящих в него элементарных движений. По сложившейся традиции в теории резания это движение исполнительного органа, имеющего большую скорость и потребляющего большую мощность. В рассматриваемой структурной схеме это шпиндель 3. Следовательно, звено соединения связей 9 целесообразно располагать между шпинделем 3 и органом настройки на траекторию  $i_x$ .

Органы настройки исполнительного движения на путь и исходную точку, как правило, на схемах не показывают. Регулирование этих параметров на станках с ручным управлением обычно осуществляют вручную по лимбам (упорам); на станках-автоматах с механическими связями – жесткими программносителями (кулачками); на станках, оснащенных системами ЧПУ, – программно, например, непосредственно на дисплее устройства ЧПУ.

Описание связей структурной схемы винторезного станка, состоящего из одной сложной формообразующей группы, приведено на вербальном языке. При системном анализе кинематической структуры следует отдать предпочтение языку символов, т.к. это обеспечивает большую наглядность и компактность описания. Приведем описание рассмотренной кинематической структуры станка на языке символов, используемом в научной литературе по станковедению и в учебной литературе для вузов:

внутренняя связь

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 6 \leftarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 7 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow P_2;$$

внешняя связь

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 9.$$

Разнонаправленные стрелки в описании внутренней связи показывают направление разветвления энергии движения после звена соединения связей 9 по обеим ветвям внутренней связи.

На четвертом этапе выведем на основе принципа возможных перемещений формулы настройки (ФН) для органов настройки  $i_x$  и  $i_v$ .

Орган настройки  $i_x$ . Внутренняя связь кинематической группы  $\Phi_v(B_1P_2)$  содержит один орган настройки. Поэтому расчетная цепь для этого органа настройки совпадает с внутренней связью. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для органа настройки  $i_x$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (P_2),$$

где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ)

$$P = 1 \cdot i_x \cdot i_{01} \cdot P_{TB},$$

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

$P_{TB}$  – шаг (кинематическая характеристика) тягового вала.

Откуда ФН

$$i_x = P/c_1,$$

где  $c_1 = i_{01} \cdot P_{TB}$  – константа.

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M$  со шпинделем 3 станка. Следовательно, РП для органа настройки  $i_v$  имеют следующий вид:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ

$$n_{ш} = n_M \cdot i_v \cdot i_{02},$$

где  $i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_v = n_{ш}/c_2,$$

где  $c_2 = n_M \cdot i_{02}$  – константа.

Выше при анализе способов обработки было показано, что частная токарная структура станка для обработки цилиндрической поверхности должна содержать две простые формообразующие группы:  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$ .

Спроектируем (*третий этап*) (рисунок 4) на основе исполнительных органов (см. рисунок 2, б) обе формообразующие группы и объединим их в частную структурную схему токарного станка с общим электродвигателем. Обычно внутренняя связь простой кинематической группы – это вращательная или поступательная кинематическая пара. В этом случае траектория исполнительного движения (окружность или прямая линия) обеспечивается конструкцией исполнительного органа.

Группа  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую (окружность) цилиндрической поверхности. Ее внутренняя связь – вращательная кинематическая пара:

*корпус передней бабки 4 → шпиндель 3, несущий заготовку 1 ( $B_1$ ).*

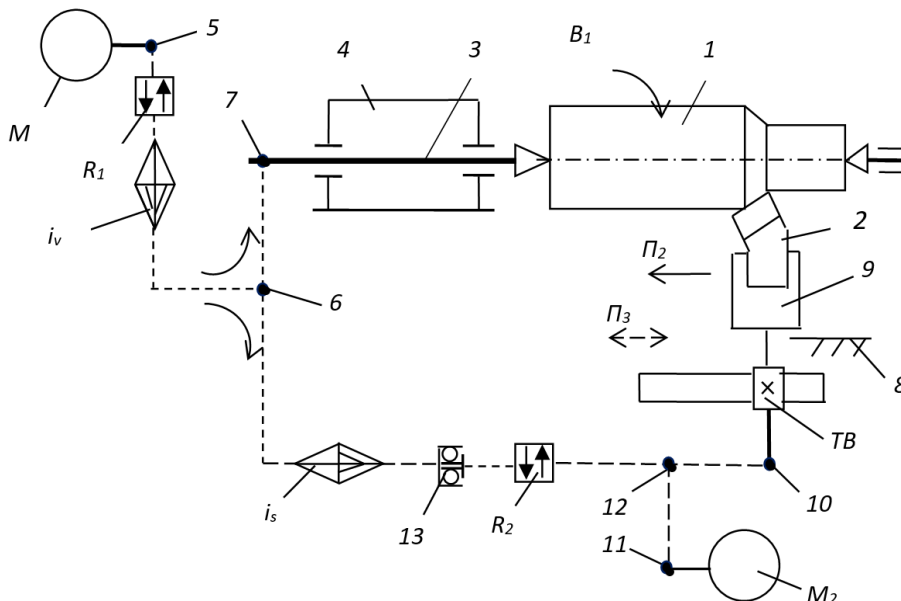
Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_v(B_1)$  и обеспечивает его качественную характеристику, т.е. траекторию. Соединим вращающееся звено внутренней связи (шпиндель 3) посредством внешней связи с электродвигателем  $M$ . Вращательное движение  $B_1$  имеет замкнутую траекторию и настраивается по двум параметрам: на скорость воспроизведения образующей и направление. Поэтому установим во внешней связи соответствующие органы настройки  $i_v$  и  $R_1$ . В итоге внешняя связь группы  $\Phi_v(B_1)$  будет иметь вид:

$M \rightarrow 5 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \text{шпиндель 3 } (B_1)$ .

Группа  $\Phi_s(\Pi_2)$  воспроизводит направляющую (прямую линию) цилиндрической поверхности. Внутренняя связь этой группы – поступательная кинематическая пара:

*направляющие 8 станины станка → каретка 9, несущая резец 2 ( $\Pi_2$ ).*

Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_s(\Pi_2)$  и обеспечивает его качественную характеристику, т.е. траекторию.



**Рисунок 4. – Частная структурная схема станка для обработки цилиндрической поверхности**

Соединим  $TB$  (зубчато-реечная передача), преобразующий вращательное движение ведущего звена (реечное колесо) в поступательное движение каретки 9, посредством внешней связи 5–6–10 с электродвигателем  $M$ . Поступательное движение  $\Pi_2$  каретки имеет незамкнутую траекторию и должно настраиваться по четырем параметрам. Поэтому установим в этой связи орган настройки  $i_s$  на скорость воспроизведения направляющей и орган настройки  $R_2$  на направление движения. Настройку на путь и исходную точку (исходное положение) осуществляют, как и в винторезной структуре, по упорам.

Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_s(\Pi_2)$

$M \rightarrow 5 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow 6 \rightarrow i_s \rightarrow R_2 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка 9 } (\Pi_2)$ .

В частной структуре токарного станка обе формообразующие группы соединены через общий электродвигатель и межгрупповую связь (общую часть внешних связей 5–6 обеих групп). В токарных станках с общим электродвигателем по традиции, сложившейся задолго до создания теории кинематической структуры, принято скорость подачи задавать относительно одного оборота шпинделя. По существу, скорость воспроизведения направляющей (прямой, параллельной оси, воспроизводимой поверхности) задается относительно абсолютной скорости воспроизведения образующей (окружности). В этом случае проявляется противоречие между понятием функции кинематической структуры станка и его настройкой. В токарных станках с ЧПУ, оснащаемых отдельным приводом групп скорости резания и подачи, такого противоречия нет. При проектировании в этих станках скорость подачи воспроизведения направляющей задается абсолютным значением.

Выведем (*четвертый этап*) ФН для органов настройки  $i_v$  и  $i_s$ .

*Орган настройки  $i_v$* . Расчетная цепь совпадает с внешней связью. Следовательно, РП для этого органа настройки имеют вид:

$$n_{M1} \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{uv} \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ

$$n_{uv} = n_{M1} \cdot i_v \cdot i_{03},$$

где  $i_{03}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_v = n_{uv} / c_3,$$

где  $c_3 = n_{M1} \cdot i_{03}$  – константа.

*Орган настройки  $i_s$* . Расчетная цепь связывает шпиндель 3 с кареткой 5. Следовательно, РП для органа настройки  $i_s$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя } 3 \rightarrow s \text{ мм перемещения каретки } 5 (P_2).$$

Тогда УКЦ

$$s = 1 \cdot i_s \cdot i_{04} \cdot [P_{TB} = \pi \cdot m \cdot z],$$

где  $P_{TB}$  – шаг тягового вала;

$m$  и  $z$  – модуль и число зубьев колеса зубчато-реечной передачи, выполняющей функцию  $TB$ ;

$i_{04}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_s = s / c_4,$$

где  $c_4 = i_{04} \cdot \pi \cdot m \cdot z$  – константа.

В кинематической структуре современных токарных станков для ускоренного перемещения (позиционирования) каретки используется ненастраиваемая вспомогательная группа с приводом от отдельного электродвигателя. Встроим такую группу в проектируемую структурную схему. Для этого электродвигатель  $M_2$  соединим с  $TB$  и во внешнюю связь группы  $\Phi_s(P_2)$  между органом настройки  $i_s$  и реверсом  $R_2$  установим обгонную муфту  $13$ . При этих условиях внутренняя связь вспомогательной группы  $Vc(P_3)$  будет совпадать с внутренней связью группы подачи. Внешняя связь вспомогательной группы примет следующий вид:

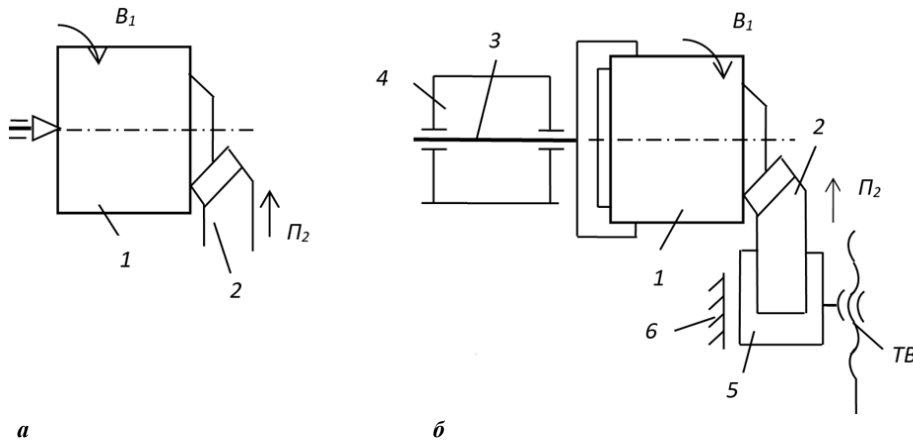
$$M_2 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка } 9 (P_3).$$

Таким образом, группа  $Vc(P_3)$  соединена с группой  $\Phi_s(P_2)$  посредством общего исполнительного органа – каретки 9. Вспомогательная группа настраивается только на направление. В современных станках управление вспомогательной группой осуществляется мнемонической рукояткой, совмещающей управление реверсом  $R_2$ , имеющим нейтральное положение, и включением электродвигателя  $M_2$ .

На рисунке 5, а приведена схема способа обработки, используемая для проточки торцов деталей типа фланцев, при проточке канавок, снятии фасок и отрезке. По этому способу (*первый этап*) заготовке 1, ориентированной в пространстве так же, как при нарезании резьбы и при продольном точении, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное движение  $P_2$ , перпендикулярно оси заготовки. Характеристический образ инструмента  $\{I\}_1$ . Класс образования поверхности «двойной след». При этом элементарное движение  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую геометрической поверхности (окружность), а элементарное движение  $\Phi_s(P_2)$  – направляющую (прямую линию, перпендикулярную оси заготовки). Следовательно, частная токарная структура станка должна содержать две простые формообразующие группы:  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(P_2)$ .

Для разрабатываемой структурной схемы (*второй этап*) исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3, смонтированный с возможностью вращения  $B_1$  в стационарном

блоке 4, называемом передней бабкой (рисунок 5, б), т.е. взаимозаменяем с подобным блоком в рассмотренных выше схемах – винторезной и для продольного точения. Исполнительный орган, несущий резец 2, – это подвижный блок 5, называемый поперечным суппортом, смонтированным с возможностью поступательного перемещения  $\Pi_2$  по направляющим продольного суппорта (каретки) 6 перпендикулярно линии центров станка. Поступательное перемещение  $\Pi_2$  поперечного суппорта обеспечивается посредством тягового вала  $TB$  (передача винт-гайка).



а – схема способа обработки; б – исполнительные органы структурной схемы

Рисунок 5. – Механическая обработка торцевой поверхности

Спроектируем (*третий этап*) на основе приведенных исполнительных органов формообразующие группы  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$  и объединим их в структурную схему токарного станка для поперечного точения (рисунок 6).

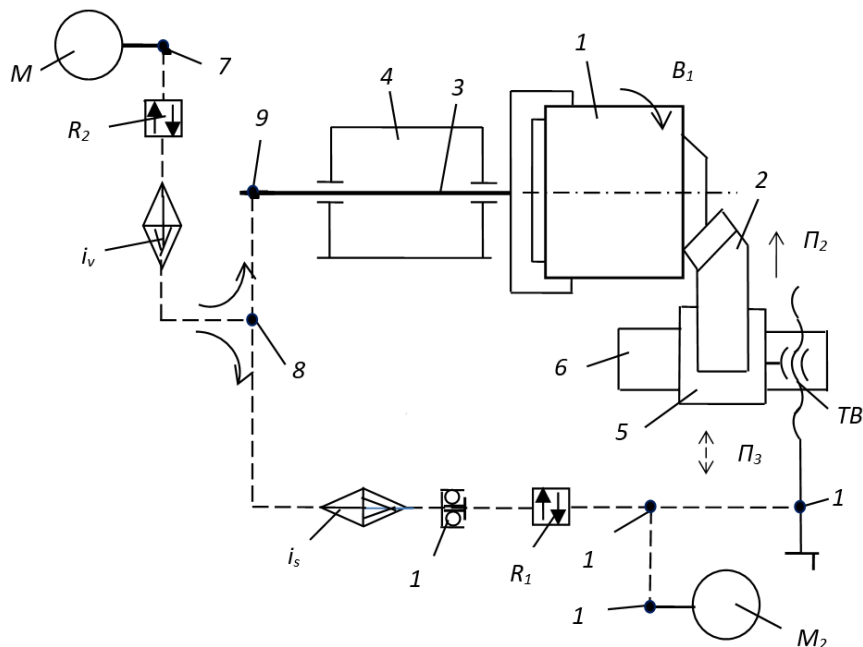


Рисунок 6. – Частная структурная схема станка для обработки торцевой поверхности

Кинематическая структура группы  $\Phi_v(B_1)$  совпадает с кинематической структурой такой же группы станка для продольного точения. Следовательно, внутренняя связь группы

корпус передней бабки 4 → шпиндель 3 ( $B_1$ ).



Внешняя связь имеет вид:

$$M \rightarrow 7 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow \text{шпиндель } 3 (B_1).$$

Вращательное движение  $B_1$  имеет замкнутую траекторию и настраивается по двум параметрам – на скорость и направление соответственно органами настройки  $i_v$  и  $R_2$ .

Внутренняя связь группы  $\Phi_s(P_2)$  – поступательная кинематическая пара:

$$\text{направляющие продольного суппорта } 6 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 5 (P_2).$$

Соединим  $TB$ , преобразующий вращательное движение ведущего звена (винта) в поступательное движение поперечного суппорта 5, с электродвигателем  $M$  посредством внешней связи 7–8–10. Поступательное движение  $P_2$  поперечного суппорта 5 имеет незамкнутую траекторию и должно настраиваться по четырем параметрам. Поэтому введем во внешнюю связь орган настройки на скорость  $i_s$  и орган настройки на направление  $R_1$ . Настройка на путь и исходную точку (исходное положение) осуществляется так же, как и в структуре для продольного течения, по упорам.

Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_s(P_2)$  будет иметь вид:

$$M \rightarrow 7 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow i_s \rightarrow R_1 \rightarrow 10 \rightarrow TB \rightarrow \text{поперечный суппорт } 5 (P_2).$$

В структуре станка обе формообразующие группы соединены через общий электродвигатель  $M$ . При этом межгрупповая связь обеспечивается общим участком 7–8, входящим во внешние связи обеих формообразующих групп.

Выведем (*четвертый этап*) ФН для органов настройки  $i_v$  и  $i_s$ .

*Орган настройки  $i_v$* . Расчетная цепь совпадает с внешней связью. Следовательно, РП для этого органа настройки имеют вид:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ

$$n_{ш} = n_M \cdot i_v \cdot i_{05},$$

где  $i_{05}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_v = n_{ш} / c_5,$$

где  $c_5 = n_M \cdot i_{05}$  – константа.

*Орган настройки  $i_s$* . Расчетная цепь связывает шпиндель 3 с поперечным суппортом 5. Следовательно, РП для органа настройки  $i_s$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя } 3 \rightarrow s \text{ мм перемещения поперечного суппорта } 5 (P_2).$$

Тогда УКЦ

$$s = 1 \cdot i_s \cdot i_{06} \cdot P_{TB},$$

где  $P_{TB}$  – шаг тягового вала;

$m$  и  $z$  – модуль и число зубьев колеса зубчато-реечной передачи, выполняющей функцию  $TB$ ;

$i_{06}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_s = s / c_6,$$

где  $c_6 = i_{06} \cdot P_{TB}$  – константа.

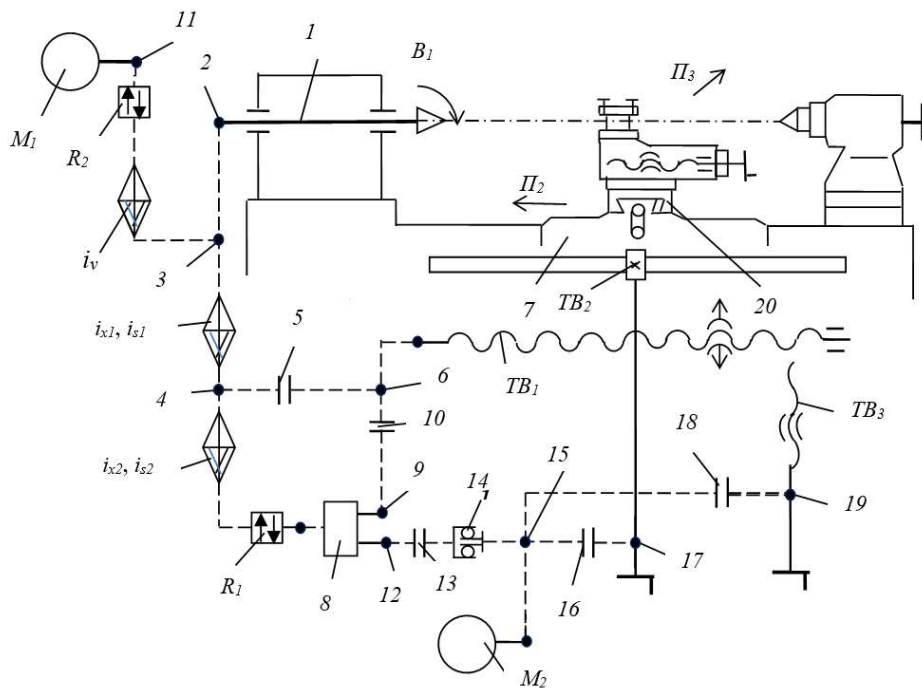
Встроим в разрабатываемую структурную схему вспомогательную группу  $Bc(P_3)$  с приводом от отдельного электродвигателя. Для этого электродвигатель  $M_2$  соединим с  $TB$  и во внешнюю связь группы поперечной подачи  $\Phi_s(P_2)$  между органом настройки  $i_s$  и реверсом  $R_1$  установим обгонную муфту 13. При этих условиях внутренняя связь вспомогательной группы будет совпадать с внутренней связью группы поперечной подачи. Внешняя связь вспомогательной группы будет иметь вид:

$$M_2 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 10 \rightarrow TB \rightarrow \text{поперечный суппорт } 5 (P_3).$$

Таким образом, группа  $Bc(P_3)$  соединена с группой  $\Phi_s(P_2)$  посредством общего исполнительного органа – поперечного суппорта 5. Вспомогательная группа настраивается только на направление. В современных станках управление вспомогательной группой осуществляется мнемонической рукояткой, совмещающей управление реверсом  $R_1$ , имеющим нейтральное положение, и включение–выключение электродвигателя  $M_2$ .

*Пятый этап.* Объединим частные структурные схемы в обобщенную структурную схему токарно-винторезного станка вполне определенного уровня универсальности. На этом этапе с целью уменьшения «длины» кинематических связей необходимо максимально использовать межгрупповые связи, рационально размещать органы настройки и переключающие механизмы.

Сравнение кинематической структуры станка для продольного точения с кинематической структурой станка для поперечного точения показывает, что они имеют одинаковую структуру группы  $\Phi_v(B_1)$ , а их группа  $\Phi_s(\Pi_2)$  отличается только исполнительными органами, несущими инструмент, и тяговыми валами. Следовательно, при объединении сравниваемых частных структурных схем в общую структуру станка группа  $\Phi_v(B_1)$  будет общей для обеих частных схем. Будет общим также участок структурной связи, включающий орган настройки  $i_s$ , и реверс  $R_1$ . С учетом этого на рисунке 7 представлена кинематико-компоновочная структурная схема токарно-винторезного станка, объединяющая разработанные на основе функционального проектирования частные структурные схемы: для нарезания резьбы, продольного и поперечного точения.



**Рисунок 7. – Кинематико-компоновочная структурная схема универсального токарно-винторезного станка**

При объединении частных структурных схем учтен также современный уровень развития кинематической структуры универсальных токарно-винторезных станков с механическими связями. В частности, органы настройки  $i_x$  и  $i_s$  объединены в общий орган настройки ( $i_x; i_s$ ). Этот орган настройки разделен на два: ( $i_{x1}, i_{s1}$ ) и ( $i_{x2}, i_{s2}$ ), расположенных последовательно. Первый орган настройки – это четырехколесная гитара сменных зубчатых колес, используемая для установки метрического (дюймового) или модульного (питчевого) исчисления и для настройки шага резьбы (параметр настройки «траектория») при нарезании точной и нестандартной резьбы. Второй – это развитая коробка скоростей, используемая для настройки на стандартные шаги нарезаемой резьбы (параметр настройки «траектория») и на подачу (параметр настройки «скорость») при продольном и поперечном точении. При этом коммутация кинематических связей обеспечивается сцепными муфтами. В итоге обобщенная структурная схема токарно-винторезного станка включает две частных винторезных структурных схемы: структурную схему для продольного точения и структурную схему для поперечного точения.

Первая винторезная структурная схема, состоящая из одной формообразующей группы  $\Phi_{v1}(B_1\Pi_2)$ , предназначена для нарезания точной и нестандартной резьбы. Ее внутренняя связь

$$B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow i_{x1} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow TB_1 \rightarrow \text{каретка } 7 \rightarrow \Pi_2;$$

внешняя связь

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3.$$

Группа настраивается: на траекторию – органом настройки  $i_{x1}$ ; на направление реверсом, совмещенным с органом настройки на траекторию; на скорость – органом настройки  $i_v$ ; на путь и исходную точку – по упорам.

Вторая винторезная структурная схема, также состоящая из одной формообразующей группы  $\Phi_v(B_1P_2)$ , предназначена для нарезания стандартной резьбы. Ее внутренняя связь

$$B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow i_{x1} \rightarrow i_{x2} \rightarrow R_1 \rightarrow \text{переключающий механизм } 8 \rightarrow 9 \rightarrow \\ \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка } 7 \rightarrow P_2;$$

внешняя связь

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3.$$

Группа настраивается: на траекторию – органом настройки  $i_{x2}$ ; на направление – реверсом  $R_1$ ; на скорость – органом настройки  $i_v$ ; на путь и исходную точку – по упорам.

Частная структурная схема для продольного точения состоит из группы скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и группы продольной подачи  $\Phi_s(P_2)$ .

Внутренняя связь группы скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  имеет вид:

$$\text{подшипниковые опоры передней бабки} \rightarrow \text{шпиндель } 1;$$

внешняя связь этой группы

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 (B_1).$$

Группа настраивается на скорость резания органом настройки  $i_v$ , на направление – реверсом  $R_2$ .

Внутренняя связь группы продольной подачи  $\Phi_s(P_2)$  имеет вид:

$$\text{направляющие станины} \rightarrow \text{каретка } 7;$$

внешняя связь этой группы

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_{s1} \rightarrow 4 \rightarrow i_{s2} \rightarrow R_1 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow \\ \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{каретка } 7 (P_2).$$

Группа настраивается: на подачу – органом настройки  $i_{s2}$ ; на направление – реверсом  $R_1$ ; на путь и исходную точку – по упорам. При этом орган настройки  $i_{s1}$  рассматривается как механизм с постоянным передаточным отношением.

Частная структурная схема станка для поперечного точения включает общую для структурных схем продольного и поперечного точения группу скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и группу поперечной подачи  $\Phi_s(P_3)$ .

Внутренняя связь группы поперечной подачи  $\Phi_s(P_3)$  имеет вид:

$$\text{направляющие каретки } 7 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20;$$

внешняя связь группы

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_{s1} \rightarrow 4 \rightarrow i_{s2} \rightarrow R_1 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow \\ \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow TB_3 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20 (P_3).$$

Группа настраивается теми же органами настройки, что и группа продольной подачи, рассмотренная выше.

Обобщенная структурная схема станка содержит также две вспомогательные группы –  $BC_1(P_2)$  и  $BC_2(P_3)$  – для ускоренных перемещений (позиционирования) соответственно каретки 7 и поперечного суппорта 20.

Внутренняя связь формообразующей группы  $\Phi_s(P_2)$  является также внутренней связью группы  $BC_1(P_2)$ . Внешняя связь вспомогательной группы  $BC_1(P_2)$  имеет вид:

$$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{каретка } 7.$$

Аналогично внутренняя связь формообразующей группы  $\Phi_s(P_3)$  является также внутренней связью группы  $BC_2(P_3)$ . Внешняя связь вспомогательной группы  $BC_2(P_3)$  имеет вид:

$$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow TB_3 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20.$$

Привод обеих вспомогательных групп осуществляется от общего электродвигателя  $M_2$ . Часть внешних связей этих групп одновременно является частью соответствующих групп подач. В современ-

ных токарно-винторезных станках включение–выключение формообразующих групп подач и вспомогательных групп ускоренных перемещений осуществляется общей мнемонической рукояткой, переключающей двухсторонние сцепные муфты 16 и 18, имеющие нейтральное положение. Данные муфты являются элементами реверсивных механизмов. Электрическая кнопка, встраиваемая в мнемоническую рукоятку, используется для включения/выключения электродвигателя  $M_2$  ускоренных перемещений исполнительных органов – каретки 7 и поперечного суппорта 20.

**Заключение.** С позиций современной университетской парадигмы познания металлорежущих станков рассмотрено использование функционального проектирования в методике разработки кинематико-компоновочных структурных схем универсальных металлорежущих станков. При этом функциональное проектирование частных структурных схем, входящих в структурную схему универсального металлорежущего станка, осуществляется по закону функционирования, задаваемому соответствующими способами формообразующей обработки. Рассмотренное использование функционального проектирования пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, что позволяет проследить путь создания, или «изобретения», кинематической или кинематико-компоновочной структурной схемы металлорежущего станка, при определенных условиях защищаемого патентом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков / А. Голембиевский. – Academic Publishing Lap Lambert, 2019. – 149 с.
2. Голембиевский, А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
3. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – Изд. второе. – М. : Машиностроение, 1970. – 407 с.
4. Металлорежущие станки : учебник : в 2 т. / Т.М. Аврамова [и др.] ; под ред. В.В. Бушуева. – М. : Машиностроение, 2012. – Т. 1. – 608 с.
5. Голембиевский, А.И. Функциональное проектирование в методике познания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 2–9.
6. Голембиевский, А.И. О выполнении чертежей к описаниям изобретений, объектом которых являются металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вопросы изобретательства. – 1980. – № 7. – С. 5–6.

Поступила 20.12.2019

### FUNCTIONAL DESIGN KINEMATIC AND LAYOUT DIAGRAMS OF UNIVERSAL METAL CUTTING MACHINES

A. GOLEMBIEVSKI

*The use of functional design in the methodology of developing kinematic-layout schemes of universal metal-cutting machines is proposed. Functional design as a synthesis of particular kinematic structures of metal-cutting machines according to the law of operation, specified by the appropriate method of forming processing. Kinematic-layout scheme of a universal machine as an association of private structural schemes. This design is based on the modern university paradigm of knowledge of machine tool equipment, based on the theory of the formation of real surfaces, the theory of the kinematic structure and the theory of tuning metal cutting machines.*

**Keywords:** *functional design, design stages, methods of shaping processing, development of particular structural diagrams of machine tools, generalized kinematic structure of a universal metal-cutting machine.*

УДК 621

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМ-МЕДЬ-КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОРАЗМЕРНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ДОБАВКОЙ

*д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК*

*(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

*Изучен механизм формирования структуры и свойств вольфрам-медь-кобальтового сплава наноразмерной углеродной добавкой. Установлено, что при электроконтактном спекании модифицированного сплава системы WC–Cu–Co происходит химическое взаимодействие углерода с расплавом Co и WC, в результате которого наблюдаются повышение содержания карбидной фазы  $Co_6W_6C$  и уменьшение размеров зерен карбида WC и двойного карбида  $Co_6W_6C$ . Установлена взаимосвязь механических и триботехнических свойств модифицированной вольфрам-медь-кобальтовой связки с концентрацией наноразмерной углеродной добавки. Показано, что использование модифицированного вольфрам-медь-кобальтового сплава в качестве металлической связки алмазного инструмента (правящие карандаши, отрезные круги) повышает стойкость инструмента в 1,5...1,6 раза.*

**Ключевые слова:** *структура материала, структурно-фазовое состояние, вольфрам-медь-кобальтовый сплав, наноразмерная углеродная добавка, физико-химические свойства, триботехнические свойства, режущий инструмент.*

**Введение.** Структурно-фазовое состояние любого материала в значительной степени определяет его свойства. Структура материала – это качественная характеристика взаиморасположения и взаимосвязей его определенных составных частей, структурных элементов. Формирование структуры материала на микро- и макроуровне зависит как от химического состава материала, наличия в нем легирующих элементов и примесей, так и от метода и режимов его получения. Общеизвестно, что мелкодисперсная зеренная структура материала характеризуется более высоким уровнем механических и триботехнических свойств по сравнению с крупнозернистым материалом того же химического состава. Получение мелкозернистой структуры возможно в процессе структурно-фазовых превращений при термической или химико-термической обработке материала в твердом состоянии, а также его кристаллизации из жидкого состояния. Во втором случае оптимальные условия для этого включают максимальное число центров кристаллизации и малую скорость роста кристаллов. Размер зерен при кристаллизации зависит и от числа частиц нерастворимых примесей, которые выступают в качестве готовых центров кристаллизации. Роль подобных центров кристаллизации могут играть специально вводимые в расплав мелкодисперсные частицы, например, наночастицы углерода [1].

Исходя из специфики функционального назначения материала связки алмазного абразивного инструмента к его структуре и свойствам предъявляются особые требования. Для эффективной работы этого инструмента материал связки должен, с одной стороны, относительно быстро изнашиваться обрабатываемым материалом, чтобы вскрывались режущие алмазные зерна, а с другой – связка должна прочно удерживать алмазные зерна с тем, чтобы они не выпадали из нее до наступления состояния предельного затупления их режущих кромок. Если связка имеет износостойкость ниже оптимальной, алмазные зерна будут преждевременно из нее выпадать, что снижает стойкость алмазного инструмента. Если износостойкость связки выше оптимальной, то вследствие чрезмерного затупления режущих зерен возрастают усилия резания, снижается режущая способность инструмента, наблюдается перегрев зоны контакта с появлением прижогов обрабатываемой поверхности и графитизацией алмаза в инструменте. Все это приводит к резкому снижению производительности и качества обработки, разрушению алмазоносного слоя инструмента. Существенное влияние на работоспособность абразивного алмазного инструмента оказывает также коэффициент трения пары «материал связки – обрабатываемый материал», поскольку в процессе абразивной обработки имеет место трибоконтакт связки с поверхностью обрабатываемого материала и уплотненными продуктами износа, поэтому материал связки должен обладать антифрикционными свойствами для снижения степени нагрева рабочей поверхности инструмента [2].

Материал связки выбирается в зависимости от вида обрабатываемого материала, типа инструмента, показателей качества обрабатываемой поверхности и ряда других требований, при этом связка может быть на металлической, полимерной или керамической основе. В качестве металлических связок алмазного абразивного инструмента используются композиции различных систем, из которых следует выделить три основные группы: мягкие медно-оловянные, средней твердости на кобальтовой или железной основе и твердые на основе кобальта и карбида вольфрама. Для улучшения прессуемости и снижения температуры спекания тугоплавких композиций в них могут вводиться такие пластичные металлы, как медь, олово и др. Из металлических связок наиболее широкое распространение получили связки систем: Cu–Sn (например, связка M2-01); Fe–Cu–Sn–Co–Ni (например, связка M6-14); WC–Cu–Co (например,

связка М6-02), при этом последняя из них применяется для правящего и отрезного алмазного инструмента, работающего при наиболее тяжелых режимах резания [3].

Цель данной работы – исследование механизма формирования структурно-фазового состояния и свойств вольфрам-медь-кобальтового сплава, модифицированного наноразмерными углеродными добавками, для возможного его применения в качестве материала связки высокоэффективного правящего и отрезного алмазного инструмента.

**Материалы и методика исследования.** Для исследования был выбран сплав системы WC–Cu–Co (WC – 66,59 масс.%; Cu – 25,77 масс.%; Co – 7,64 масс.%), применяемый в качестве металлической связки марки М6-02 при изготовлении методом спекания правящего и отрезного алмазного инструмента. В качестве модифицирующей наноразмерной углеродной добавки (НУД) использовалась алмазно-графитовая шихта ША-А (ТУ РБ 100056180.003-2003). Введение НУД в спекаемую композицию осуществлялось осаждением из коллоидного раствора частиц ША-А в этиловом спирте с последующим активированием порошковой композиции в планетарно-шаровой мельнице Активатор-2S с введенной дозы энергии  $E_a = 3,5$  Дж/г. Концентрация модифицирующей добавки варьировалась в пределах от  $C_{ША-А} = 0$  до  $C_{ША-А} = 1,0$  масс. %.

Компактирование сплава выполнялось методом электроконтактного спекания на технологическом модуле ССМ-02 при плотности тока  $i = 10$  кА/см<sup>2</sup>, длительность нагрева составляла  $t_n = 60$  с, длительность импульсов и пауз –  $t_{имп} = t_{пауз} = 0,02$  с, давление  $p = 50$  МПа.

Рентгеноструктурный анализ фазового состава образцов исследуемых спеченных сплавов выполнялся на дифрактометре ДРОН-3.0. Съемки проводились в монохроматизированном  $CoK_{\alpha}$ -излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Параметр кристаллической решетки сплавов определялся по дифракционным линиям, расположенным на больших углах рассеяния. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF-2 [4]. Твердость сплавов по Виккерсу измерялась на приборе ТП при нагрузке 294 кН, микротвердость – на микротвердомере «Microtest-II» с нагрузкой 980 Н. Исследование морфологии образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия); исследование элементного состава – с помощью микрорентгеноспектрального анализатора «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Англия). Металлографические исследования осуществлялись на микроскопе Альтами METIMT. Испытания механических свойств на сжатие исследуемых образцов (7×8×12 мм) спеченных сплавов проводились на гидравлической испытательной машине InstronSatex 300LX. Триботехнические свойства изучались на установке УТИМ-2 производства ИММС НАН Беларуси в режиме трения без смазки при давлении  $p_a = 1,0$  МПа и скорости скольжения  $V = 1,0$  м/с, материал контртела – закаленная сталь 45 (HRC 42–45).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Структурно-фазовое состояние вольфрам-медь-кобальтового сплава. Рентгенофазовый анализ показывает, что после спекания сплава системы WC–Cu–Co без добавки ША-А образуются фазы: WC ( $P6m2$ ,  $a = 0,2906$  нм и  $c = 0,2837$  нм); Cu ( $Fm3m$ ,  $a_{табл.} = 0,3615$  нм);  $M_6C$  ( $Co_2W_4C$ ;  $Fd3m$ ,  $a = 1,128$  нм) и  $M_{12}C$  ( $Co_6W_6C$ ;  $Fd3m$ ,  $a = 1,089$  нм) (рисунок 1, а).

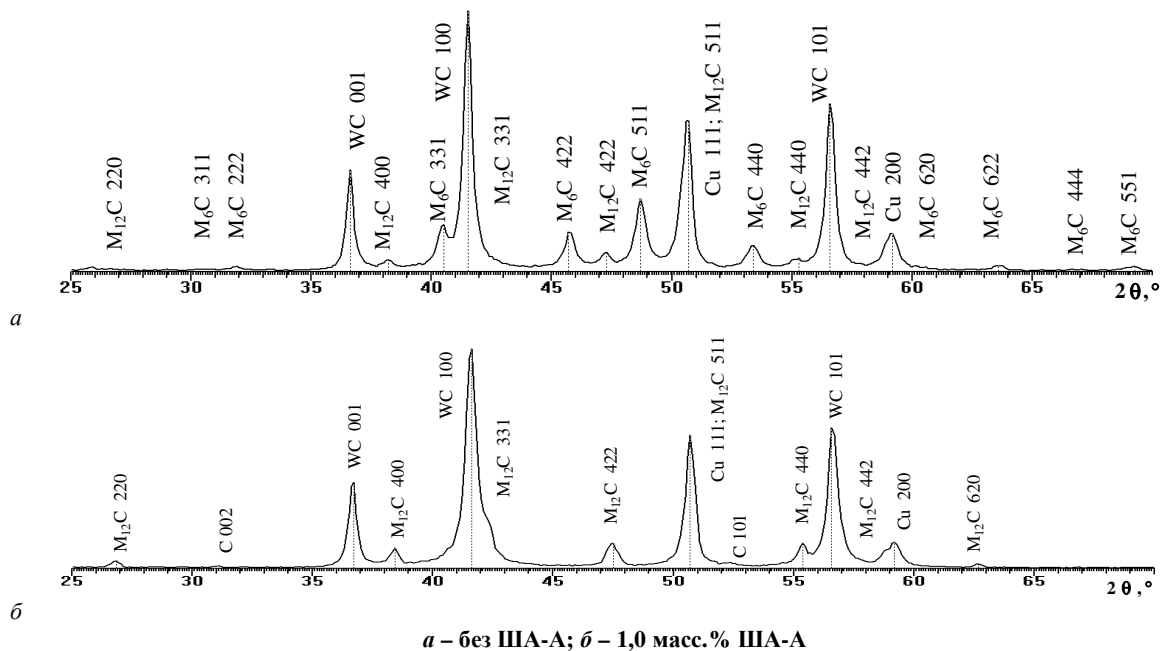


Рисунок 1. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $CoK_{\alpha}$ ) сплава системы WC–Cu–Co, спеченного по различным технологиям

Спекание сплава системы WC–Cu–Co, модифицированного наноразмерными частицами ША-А, приводит к существенным изменениям в фазовом составе спеченного сплава (см. рисунок 1, б). В частности, в сплаве не обнаруживаются частицы фазы  $M_6C$  ( $Co_2W_4C$ ) и регистрируется существенное увеличение содержания фазы  $M_{12}C$  ( $Co_6W_6C$ ). Кроме этого, в сплаве регистрируется присутствие графита.

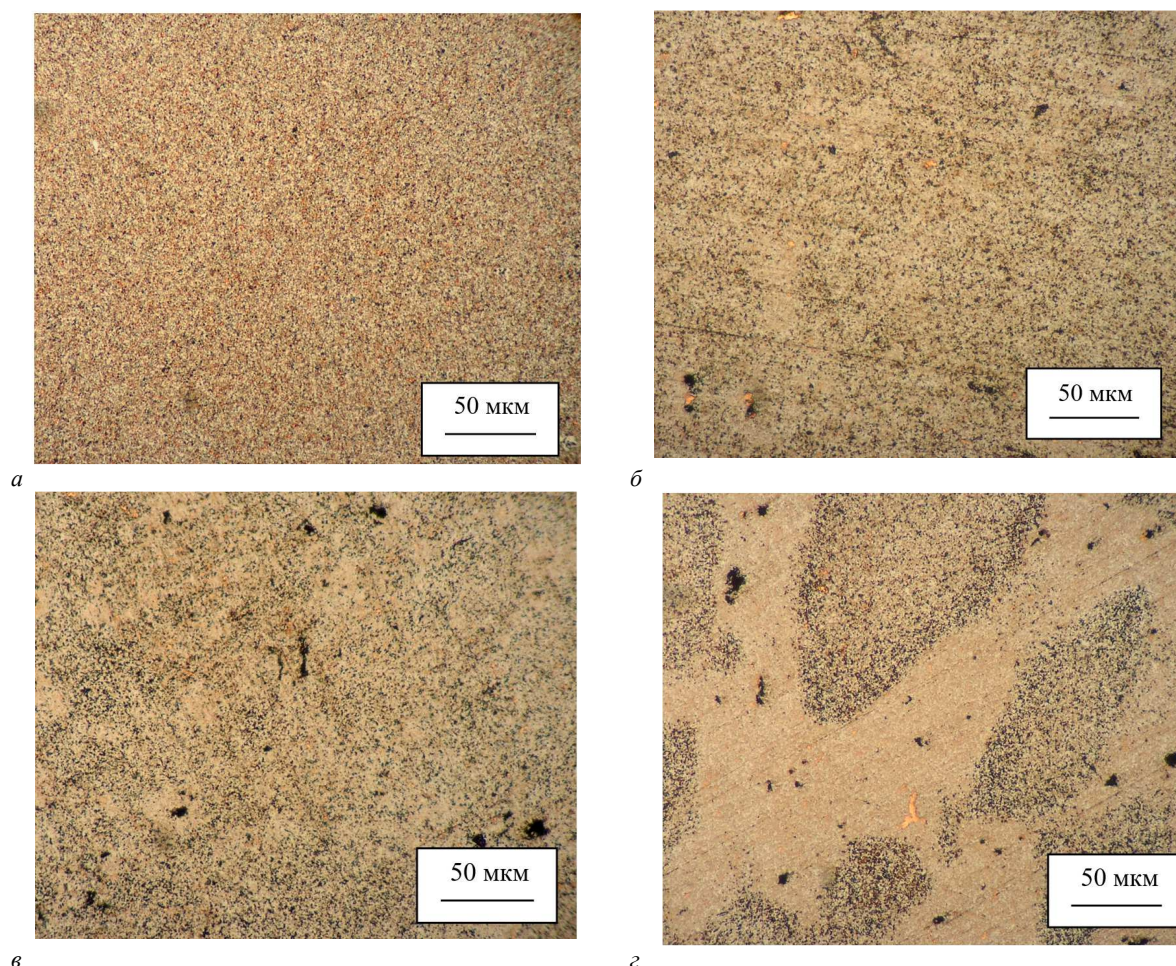
Влияние концентрации НУД на фазовый состав спекаемого сплава может быть оценено по объемной концентрации характерной фазы, определяемой на основе результатов рентгеноструктурных исследований, аналогично изложенному в работе [5]. В качестве характерной фазы для сплава системы WC–Cu–Co может быть выбран двойной карбид  $Co_6W_6C$ , объемное содержание которого для различной концентрации шихты ША-А представлено в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость содержания карбида  $Co_6W_6C$  в сплаве системы WC–Cu–Co от содержания НУД

Характерная фаза	Концентрация ША-А, масс.%			
	0	0,5	0,75	1,0
Карбид $Co_6W_6C$	Содержание характерной фазы, об.%			
	5...6	8...9	10...12	15...16

Из представленных данных видно, что содержание двойного карбида  $Co_6W_6C$  в спекаемом сплаве системы WC–Cu–Co увеличивается с 5...6 об.% при  $C_{ША-А} = 0$  до 15...16 об.% при  $C_{ША-А} = 1,0$  масс.%

На рисунке 2 представлены изображения микроструктуры сплава системы WC–Cu–Co (связка М6-02) с различным содержанием модифицирующей наноглеродной добавки.



а – 0; б – 0,5; в – 0,75; г – 1,0 масс.%

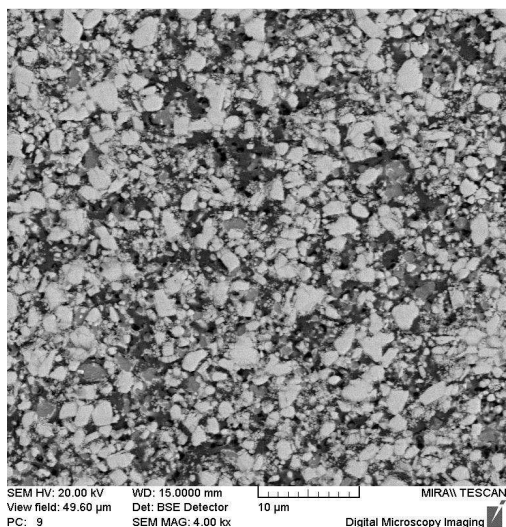
Рисунок 2. – Металлографические изображения микроструктуры сплава системы WC–Cu–Co с различным содержанием добавки ША-А

Проведенный металлографический анализ показал, что в результате электроконтактного спекания немодифицированного сплава WC–Cu–Co образуются основные фазы WC, Cu, а также двойные

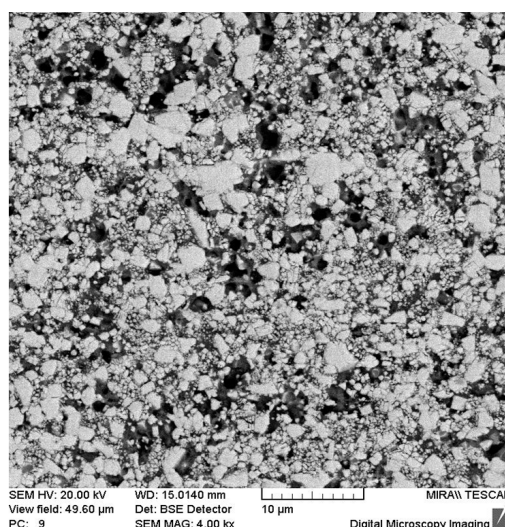
$\eta$ -карбиды  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  и  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ . Медь может взаимодействовать с кобальтом с образованием твердого раствора  $\text{Cu}(\text{Co})$  [6], выступающего в качестве связки в сплаве и распределяющегося между кристаллами карбидов (см. рисунок 2, а).

Карбид  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  согласно диаграмме состояния находится в равновесии с жидкой фазой и имеет широкую область гомогенности. Этот карбид имеет высокую хрупкость и оказывает отрицательное влияние на прочность сплава. Карбид  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  формируется в процессе охлаждения по твердофазной реакции и характеризуется малым размером зерна, что повышает пластичность сплава [7; 8]. Введение углеродного модификатора ША-А приводит к значительному увеличению количества двойного карбида  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  (см. рисунок 2, б-г), который имеет узкую область гомогенности ниже  $1000^\circ\text{C}$  и вызывает исчезновение фазы  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ . Однако при большой концентрации углеродной добавки ( $C_{\text{ША-А}} \geq 0,75$  масс.%) наблюдаются нарушение гомогенного распределения фаз в сплаве и образование локальных областей с повышенной концентрацией двойного карбида  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  и графита (см. рисунок 2, в, г).

Изучение структуры немодифицированного сплава с помощью сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах (белые области – карбид  $\text{WC}$ , светло-серые – двойные  $\eta$ -карбиды, темно-серые –  $\text{Cu}$ , черные – углерод) (рисунок 3, а, д) показало, что кристаллы карбида вольфрама  $\text{WC}$  имеют достаточно широкий разброс размеров. При этом мелкие кристаллы имеют четкую огранку, что характерно для кристаллизации из расплава. Согласно диаграммам равновесия кобальт образует с карбидом вольфрама  $\text{WC}$  эвтектику, температура плавления которой  $1300^\circ\text{C}$ . При электроконтактном спекании сплава системы  $\text{WC-Cu-Co}$  происходит нагрев материала выше  $1400^\circ\text{C}$ , в результате чего эвтектика плавится и растворяет некоторое количество избыточного карбида вольфрама. При охлаждении имеющиеся в избытке нерастворившиеся кристаллы карбида вольфрама служат центрами кристаллизации, и на них осаждается из расплава растворенный в ней карбид. Благодаря тому, что для  $\text{WC}$  имеются центры кристаллизации, а для кобальта они отсутствуют (поскольку кобальт склонен к переохлаждению), происходит дальнейшая кристаллизация с образованием двойных  $\eta$ -карбидов состава  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  и  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ . При этом карбид  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  является метастабильным и образуется при быстром охлаждении в области температур выше  $1150^\circ\text{C}$ . При снижении скорости охлаждения или повышении диффузионной подвижности атомов углерода карбид  $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$  в процессе охлаждения при температуре ниже  $1150^\circ\text{C}$  распадается по схеме  $M_6\text{C} \rightarrow M_{12}\text{C} + \text{WC}$  с образованием более стабильного карбида  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ . В модифицированном сплаве в расплавленной эвтектике наряду с нерастворенными частицами  $\text{WC}$  присутствуют дисперсии углерода, которые выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации и способствуют измельчению формирующихся карбидных частиц. Введение в состав спекаемой шихты наноразмерной углеродной добавки, с одной стороны, повышает диффузионную активность спекаемой системы [9], а с другой – обеспечивает более равномерное распределение источников тепловыделения при электроконтактном нагреве и снижение скорости охлаждения в микрообъемах спекаемого сплава [10]. При этом повышенное содержание углерода в модифицированном сплаве инициирует преимущественное образование более пластичного карбида  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ . В результате структура модифицированного сплава представляет собой крупные кристаллы карбида вольфрама, окруженные мелкими кристаллами  $\text{WC}$  в связке из твердого раствора кобальта в меди  $\text{Cu}(\text{Co})$  с отдельными частицами карбидов  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  (рисунок 3, б-г, е).

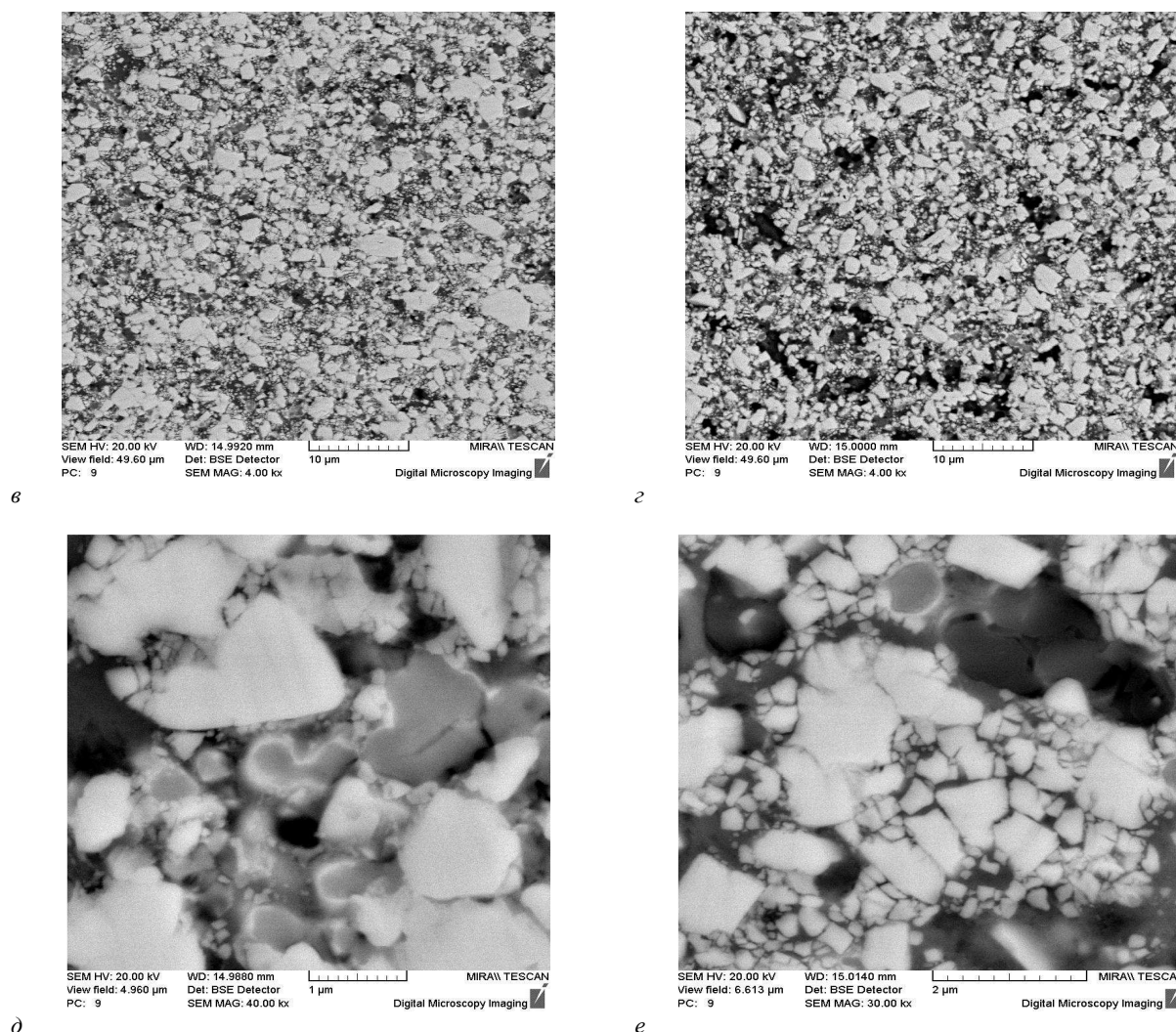


а



б





*a, д – 0; б – 0,5; в – 0,75; г, e – 1,0 масс. %*  
(СЭМ, в обратно отраженных электронах)

**Рисунок 3. – Влияние добавки ША-А на размер структурных составляющих сплава системы WC-Cu-Co при различном содержании добавки ША-А**

Изменение размеров элементов структуры сплава в зависимости от концентрации ША-А приведены в таблице 2. Размер частиц первичных WC с добавлением нанокремнезёмного модификатора уменьшается в среднем от 2,0–3,0 мкм до 0,8–1,2 мкм. При этом размер вторичных кристаллов WC находится на уровне 0,13–0,19 мкм и практически не зависит от концентрации ША-А. Размер двойных карбидных частиц  $Co_6W_6C$  при модифицировании сплава уменьшается в среднем с 1,2–2,3 мкм до 0,5–1,0 мкм при одновременном повышении их содержания в сплаве. Размер графитовых включений с повышением концентрации модификатора ША-А увеличивается и для  $C_{ША-А} = 1,0$  масс.% составляет 0,8–1,2 мкм.

Таблица 2. – Зависимость размера элементов структуры сплава системы WC-Cu-Co от содержания НУД

Элементы структуры	Размер элементов структуры, мкм			
	Концентрация ША-А, масс.%			
	0	0,5	0,75	1,0
Карбиды WC (первичные)	2,0–3,0	1,3–1,7	1,1–1,5	0,8–1,2
Карбиды WC (вторичные)	0,13–0,16	0,15–0,17	0,17–0,19	0,16–0,18
Карбиды $Co_6W_6C$	1,2–2,3	0,8–1,9	0,6–1,5	0,5–1,0
Графит	–	0,3–0,7	0,3–1,0	0,8–1,2

Таким образом, при электроконтактном спекании введение в состав порошковой композиции наноразмерной углеродной добавки способствует изменению фазового состава спекаемого сплава системы WC-Cu-Co и формированию более гомогенной и дисперсной структуры за счет высоких

структурообразующих свойств вводимых в спекаемую композицию углеродных наночастиц и повышенной диффузионной активности углерода добавки. При добавлении модификатора в количестве до  $C_{\text{ША-А}} = 1,0$  масс.% размер характерных фаз снижается в 2–3 раза.

*Физико-механические и триботехнические свойства вольфрам-медь-кобальтового сплава.* Изучение влияния концентрации наноразмерной углеродной добавки на микротвердость модифицированного сплава системы WC–Cu–Co показало, что ее уровень для спеченного сплава системы WC–Cu–Co без добавки ША-А  $HV = 3260–3280$  МПа, при этом пористость составляет  $\Pi = 1,5–2,0$  % и представлена в виде отдельных пор, рассеянных по всему сечению образца. Твердость сплава системы WC–Cu–Co, спеченного с добавлением частиц ША-А, существенно возрастает по сравнению с немодифицированным сплавом и находится на уровне  $HV = 3910–4100$  МПа, т.е. для сплава, способного образовывать с углеродом твердые растворы или упрочняющие карбидные фазы, наноразмерная углеродная добавка приводит к увеличению твердости спекаемых композитов. Максимальная твердость соответствует сплаву с содержанием модификатора  $C_{\text{ША-А}} = 0,75$  масс.% (рисунок 4), а ее снижение при  $C_{\text{ША-А}} > 0,75$  масс.% обусловлено, по-видимому, чрезмерным увеличением содержания графита в спеченном сплаве. При этом пористость модифицированного сплава остается практически на прежнем уровне ( $\Pi = 2,0–2,5$  %).

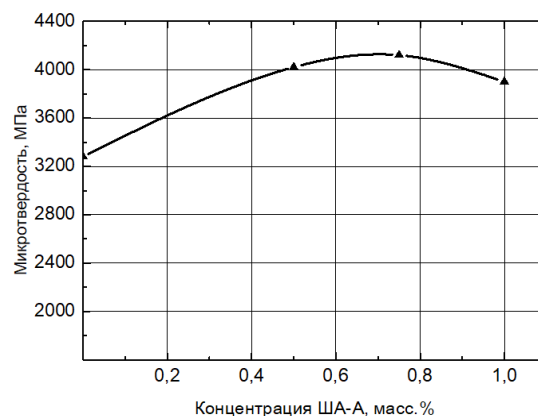
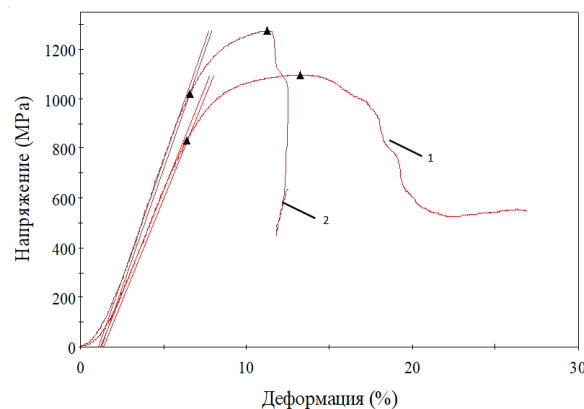


Рисунок 4. – Зависимость микротвердости сплава системы WC–Cu–Co от концентрации добавки ША-А

Результаты механических испытаний образцов спеченного сплава при сжатии показывают, что модифицирование порошкового сплава системы WC–Cu–Co добавкой шихты ША-А сопровождается возрастанием прочностных характеристик и твердости этого сплава (рисунок 5, таблица 3) при существенном увеличении количества содержащейся в спеченном сплаве фазы  $M_{12}C$  ( $Co_6W_6C$ ) при низком уровне пористости спека. Указанные особенности формирования структуры и механических свойств сплава WC–Cu–Co при спекании порошковой шихты, содержащей добавку ША-А, обусловлены активным взаимодействием наноразмерных углеродных частиц добавки с частицами WC и Co в процессе интенсивного деформационно-термического воздействия.



1 – без ША-А; 2 – 1,0 масс.% ША-А

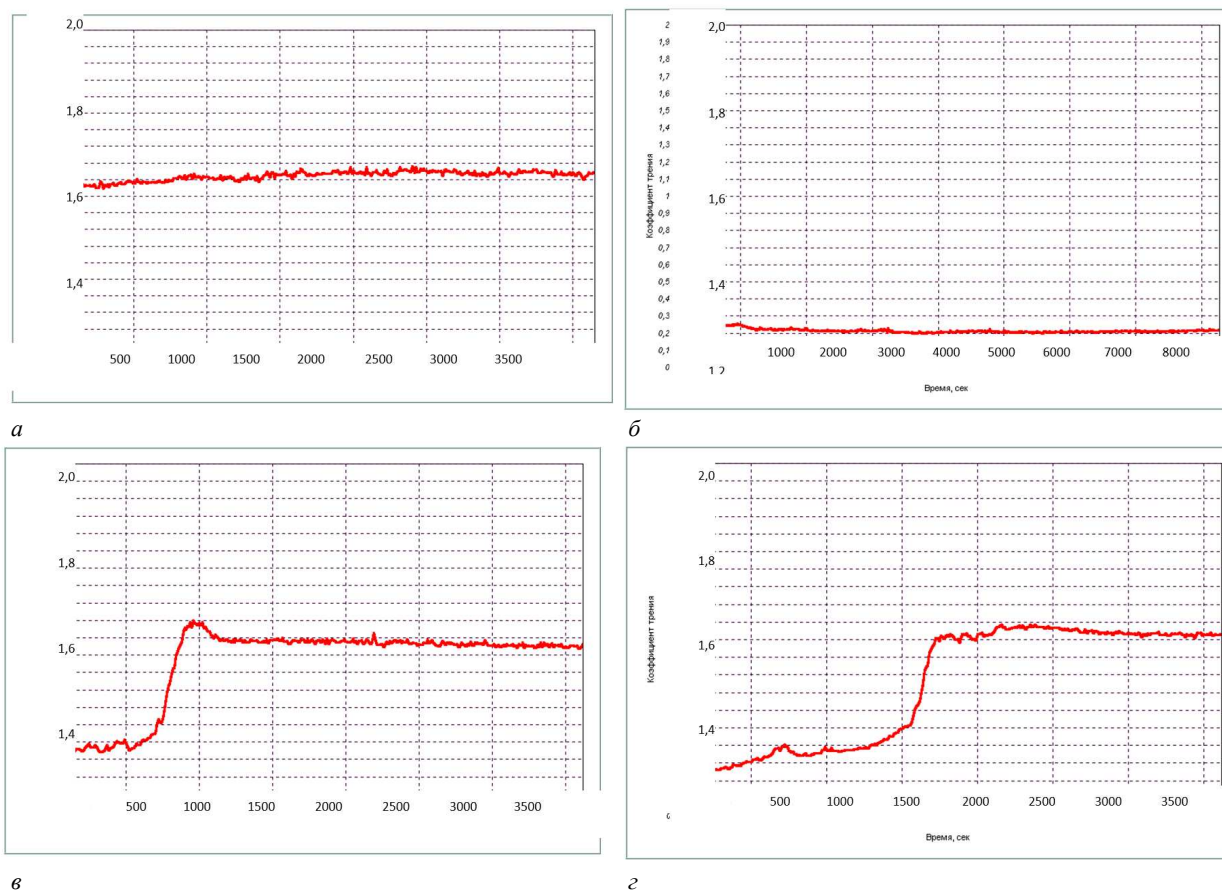
Рисунок 5. – Диаграммы сжатия образцов сплавов системы WC–Cu–Co, спеченного по различным технологиям

Таблица 3. – Результаты испытаний на сжатие спеченных сплавов

Состав сплава	Предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2}$ , МПа	Деформация, %	Предел прочности при сжатии $\sigma_b$ , МПа	Твердость $HV$ , МПа
WC–Cu–Co	833,6	13,27	1 097,03	3260–3280
WC–Cu–Co+1,0 масс.% ША-А	1 020,5	11,27	1 275,01	3910–3930

Триботехническим испытаниям были подвергнута металлическая связка М6-02 (система WC–Cu–Co), в которой концентрация ША-А варьировалась от  $C_{\text{ША-А}} = 0$  до  $C_{\text{ША-А}} = 1,0$  масс.%. Наиболее наглядно степень влияния вводимого модификатора на триботехнические свойства материала связки характеризуется изменением коэффициента трения в процессе испытаний. Продолжительность испытаний для немодифицированной связки составляла 3600 с, а для связок, содержащих ША-А, – 3600–8000 с. Кинетика изменения коэффициента трения при различной концентрации модифицирующей добавки ША-А представлена на рисунке 6. В результате испытаний установлено, что введение в состав металлической связки алмазно-графитовой наноразмерной добавки существенно снижает коэффициент трения, по всей вероятности, за счет наличия графитовой фазы в составе добавки. Из приведенных данных видно, что с точки зрения триботехнических свойств для связки М6-02 оптимальной является концентрация добавки ША-А, равная  $C_{\text{ША-А}} = 0,50$  масс.%, при которой коэффициент трения составляет  $f = 0,20\text{--}0,24$  (рисунок 6, б), в то время как для связки М6-02 без ША-А коэффициент трения находится на уровне  $f = 1,05\text{--}1,18$  (рисунок 6, а).

Модифицирование металлической связки М6-02 добавкой ША-А снижает интенсивность изнашивания с  $I_h = (7,15\text{--}8,53) \cdot 10^{-8}$  до  $I_h = (1,75\text{--}1,86) \cdot 10^{-8}$ .

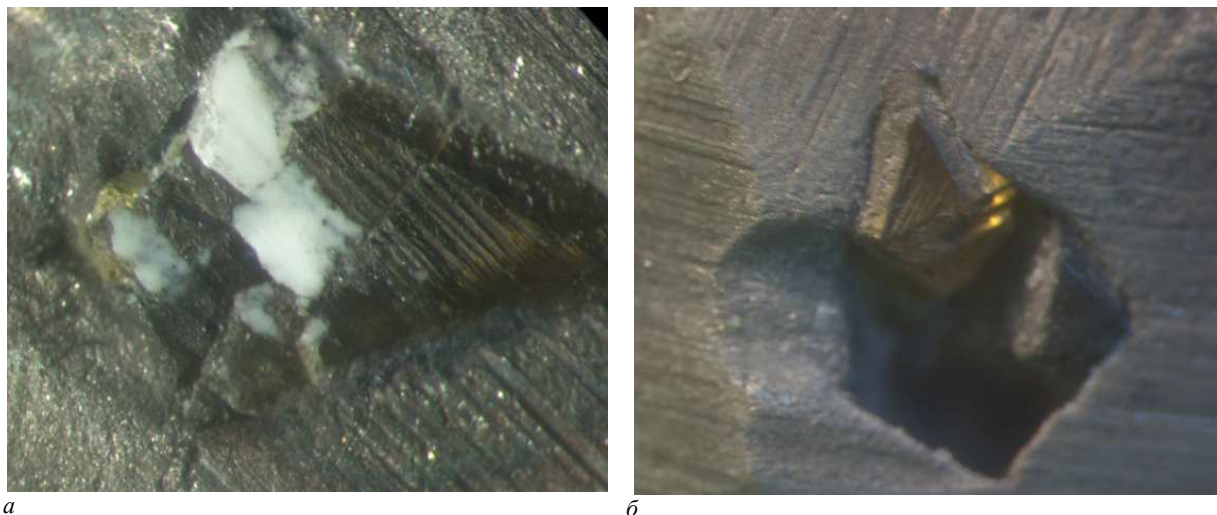


а – 0; б – 0,5; в – 0,75; г – 1,0 масс. %

Рисунок 6. – Изменение коэффициента трения связки М6-02 при различной концентрации модификатора ША-А:

*Практическая апробация модифицированного вольфрам-медь кобальтового сплава.* На основе проведенных исследований разработаны два варианта металлической связки для алмазного инструмента с различным содержанием наноразмерного углеродного модификатора (М6-02\* и М6-02\*\*), и предложен способ приготовления порошковой шихты для них [11]. Триботехнические испытания разработанных металлических связок показали снижение коэффициента трения и повышение износостойкости по сравнению с прототипом – связкой М6-02. Эти факторы обеспечивают снижение тепловыделения в зоне резания при абразивной обработке и уменьшение термонагруженности на металлическую связку и алмазные зерна, что снижает вероятность графитизации алмаза в инструменте.

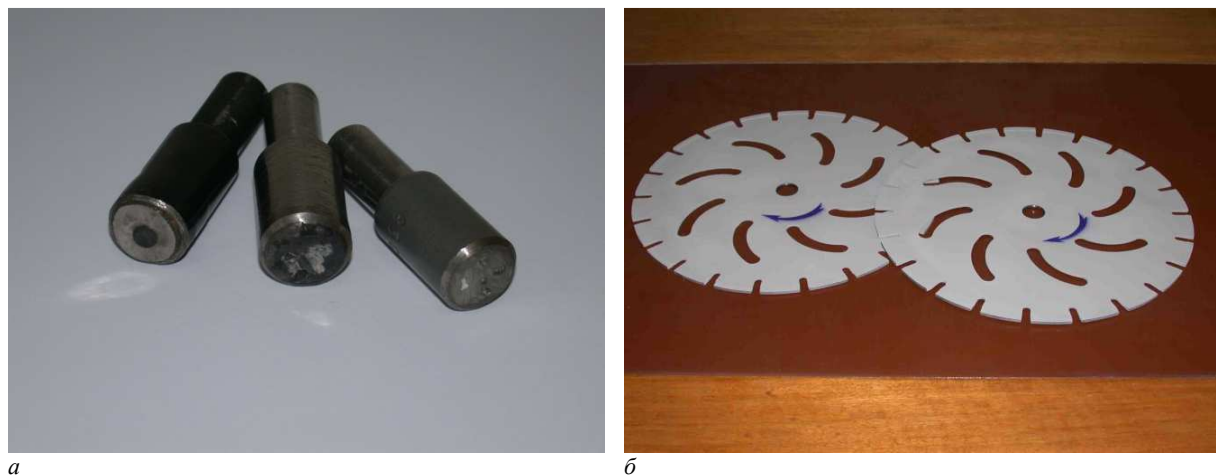
В процессе изучения механизма изнашивания режущих элементов правящих алмазных карандашей, изготовленных на основе модифицированных металлических связок и поликристаллических алмазов или монокристаллов СТМ «Алмазот», установлено повышение сил алмазоудержания и, как следствие, снижение удельного расхода алмаза на 25–50% для модифицированной связки. Наноразмерная углеродная добавка в связке на вольфрам-медь-кобальтовой основе частично вступает в химическую реакцию с металлами матрицы с образованием карбидов, повышая микротвердость и износостойкость матричного материала. Усиливается адгезионное взаимодействие компонентов связки с режущими алмазными зёрнами композита, повышается прочность их удержания в ней (рисунок 7). Проведенные эксплуатационные испытания алмазных карандашей для правки абразивных кругов показали, что модифицирование связки наноразмерной углеродной добавкой обеспечивает более равномерный износ режущего элемента и материала связки и повышение удельной производительности на 25–30%, при этом точность размеров круга после правки составляет 0,05–0,10 мм.



**Рисунок 7. – Площадка износа кристалла СТМ «Алмазот» с образовавшимися трещинами (а) и остатки кристалла, удерживаемые металлической связкой (б)**

Для изготовления опытных партий отрезных алмазных рогов использовались связки М6-02\* и М6-02\*\*, модифицированные порошком ША-А с концентрацией  $C_{\text{ША-А}} = 0,50$  масс.% и  $C_{\text{ША-А}} = 0,75$  масс.% соответственно. Как показали испытания, при резке гранита типа «габбро», производительность опытных отрезных кругов составила 290 см<sup>2</sup>/мин (среднее значение) при удельном расходе алмаза 0,8–1,0 карат/м<sup>2</sup>. Применение модифицированной связки позволяет интенсифицировать режимы эксплуатации инструмента. Так, окружная скорость обработки выросла на 15–20%, глубина пропила на 10%, а производительность на 25–30%. Эксплуатационная стойкость инструмента увеличилась в 1,5–1,6 раза.

Результаты исследований свойств модифицированной вольфрам-медь-кобальтовой связки, а также данные эксплуатационных испытаний алмазных правящих карандашей (рисунок 8, а) и алмазных отрезных кругов (рисунок 8, б) позволили разработать рекомендации по условиям их эксплуатации. В правящих карандашах для обработки мягких (М) и среднемягких (СМ) абразивных кругов рекомендуется применять модифицированную связку М6-02\* с концентрацией ША-А, соответствующей  $C_{\text{ША-А}} = 0,50$  масс.%, а в карандашах для обработки твердых (Т) и чрезвычайно твердых (ЧТ) кругов – модифицированную связку М6-02\*\* с концентрацией ША-А, равной  $C_{\text{ША-А}} = 0,75$  масс.%. Связка М6-02\* эффективна для применения в отрезных кругах при обработке мягких пород типа мрамор, а связка М6-02\*\* – для обработки гранитов и бетонов различной прочности.



а

б

**Рисунок 8. – Алмазные карандаши для правки абразивных кругов (а) и алмазные отрезные круги для резки бетона (б) с вольфрам-медь-кобальтовой связкой, модифицированной НУД**

**Заключение.** На основании полученных результатов установлено, что при электроконтактном спекании модифицированного наноразмерной углеродной добавкой (шихта ША-А) сплава системы WC–Cu–Co происходит химическое взаимодействие углерода с расплавом Co и WC, в результате которого повышается содержание карбидной фазы  $Co_6W_6C$ , что наряду с уменьшением размеров зерен карбида WC и двойного карбида  $Co_6W_6C$  способствует усилению твердости сплава. Однако появляющаяся неоднородность распределения двойного карбида и увеличение количества включений графита при добавлении модификатора в количестве  $C_{ША-А} \geq 0,75$  масс.% несколько снижают твердость сплава.

Установленная взаимосвязь триботехнических свойств модифицированной связки системы WC–Cu–Cос концентрацией наноразмерной углеродной добавки обусловлена структурой получаемого композита, которая при превышении оптимальной концентрации шихты ША-А характеризуется увеличенным содержанием хрупких составляющих (карбиды), частицы которых выкрашиваются при трибоконтакте и вызывают повышение коэффициента трения. На примере металлической связки для алмазного инструмента М6-02 показано, что оптимальное значение концентрации модифицирующей наноразмерной углеродной добавки находится в пределах  $C_{ША-А} = 0,50–0,75$  масс.%. При этом коэффициент трения металлических связок с добавкой ША-А снижается в 4,3–5,9 раза, а износостойкость возрастает в 3,8–4,9 раза при увеличении твердости на 15–25% и прочностных характеристик при сжатии на 12–16% по сравнению с немодифицированным сплавом системы WC–Cu–Co. Повышение антифрикционных свойств модифицированных сплавов обусловлено наличием в их структуре графитоподобных фаз модифицирующей добавки, а увеличение прочности и износостойкости – формированием более однородной и дисперсной структуры и повышенным содержанием упрочняющих фаз (карбидов).

На основе проведенных исследований разработаны два варианта металлической связки для алмазного инструмента с различным содержанием наноразмерного углеродного модификатора (М6-02\* и М6-02\*\*) и предложен способ приготовления порошковой шихты для них. Испытания алмазных карандашей для правки абразивных кругов показали, что модифицирование связки наноразмерной углеродной добавкой обеспечивает более равномерный износ режущего элемента и материала связки и повышение удельной производительности на 25–30%, при этом точность размеров круга после правки составляет 0,05–0,10 мм. Применение модифицированной связки в алмазных отрезных кругах позволяет интенсифицировать режимы их эксплуатации, в частности, окружная скорость обработки выросла на 15–20%, глубина пропила – на 10%, а производительность – на 25–30%. Эксплуатационная стойкость инструмента увеличилась в 1,5–1,6 раза. Результаты исследований структуры и свойств модифицированной НУД вольфрам-медь-кобальтовой связки, а также данные эксплуатационных испытаний алмазных правящих карандашей и алмазных отрезных кругов позволили разработать рекомендации по рациональным условиям их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Белорус. наука, 2011. – 527 с.
2. Верещагин, В.А. Композиционные алмазосодержащих материалы и покрытия / В.А. Верещагин, В.В. Журавлев. – Минск : Наука и техника, 1991. – 208 с.

3. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенють. – Минск : Белорус. наука, 2005. – 359 с.
4. Powder Diffraction File. Data Cards. Inorganic Section. Sets 1–34. JCPDS. Swarthmore. – Pennsylvania. – USA 1948–1984.
5. Жорник, В.И. Влияние наноразмерных углеродных добавок на структурно-фазовое состояние и механические свойства спеченных сплавов / В.И. Жорник, В.А. Кукареко, С.А. Ковалева // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / ред. кол.: П.А. Витязь (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2011. – С. 412–423.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справ. : в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 3. – Кн. 2. – 448 с.
7. Либенсон, Г.А. Производство порошковых изделий / Г.А. Либенсон. – М. : Metallurgia, 1990. – 240 с.
8. Pollock, С.В. The eta carbides in the Fe–W–C and Co–W–C systems / С.В. Pollock, Н.Н. Stadelmaier // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1970. – Vol. 1, № 4. – P. 767–770.
9. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.
10. Витязь, П.А. Термодинамические аспекты получения композитов спеканием порошковых металлических материалов, модифицированных наноразмерными углеродными добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.С. Вихренко // Доклады НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 6. – С. 122–130.
11. Металлическая связка для получения композиционного материала и способ ее приготовления : пат. 10305 Респ. Беларусь : МПК<sup>7</sup> В 24D / А.И. Полуян, О.О. Смиловенко, В.И. Жорник, Н.Н. Прокопович ; дата публ.: 28.02.2008.

Поступила 03.01.2020

#### STRUCTURAL-PHASE STATE AND PROPERTIES OF TUNGSTEN-COPPER-COBALT ALLOY MODIFIED BY NANO-SIZED CARBON ADDITIVE

V. ZHORNIK

*The mechanism of the formation of the structure and properties of the tungsten-copper-cobalt alloy by nanosized carbon additive is studied. It was found that, the chemical interaction of the carbon with the Co and WC melt occurs during the electrocontact sintering of the modified alloy of the WC–Cu–Co system, which results in an increase in the content of the carbide phase  $Co_6W_6C$  and the decrease of the grain size of WC carbide and  $Co_6W_6C$  double carbide. The relationship of the mechanical and tribotechnical properties of the modified tungsten-copper-cobalt binder with the concentration of nanosized carbon additives is established. It is shown that the use of the modified tungsten-copper cobalt alloy as a metal bond of a diamond tool (straightening pencils, cutting wheels) increases the tool life by 1.5–1.6 times.*

**Keywords:** material structure, structural-phase state, tungsten-copper-cobalt alloy, nano-sized carbon additive, physicochemical properties, tribological properties, cutting tool.

УДК 372.862

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)

Представлены анализ основных эвристических методов стимуляции мышления в ходе решения тех или иных задач и перспективы их использования в условиях производства. Рассмотрена концепция применения метода морфологического анализа для решения конкретных производственных проблем. Приведен пример выявления данным методом причин возникновения брака.

**Ключевые слова:** техническая проблема, методы решения, методы Цвикки, метод черного ящика.

**Вступление.** Одна из особенностей современного профессионального образования – постоянный рост количества информации и навыков, которыми должны овладеть учащиеся и специалисты. Студенты в ходе инженерной практики сталкиваются с освоением новых видов продукции (в т.ч. из новых материалов), диверсифицированием поставщиков сырья, завоевыванием новых рынков сбыта и т.д. При этом важно уметь урегулировать возникающие проблемы в кратчайшее время и наиболее выгодным в экономическом смысле способом. Поэтому инженеру необходимо не только знать современные эффективные методы стимулирования мышления, направленные на совершенствование творческого процесса, но и уметь их использовать на практике. Методы морфологического анализа, применяемые для принятия оптимальных технических решений, позволяют не только эффективно решать производственные задачи, но и расширять свой уровень знаний и умений.

**Основная часть. Выделение цели.** На производстве при возникновении систематического брака продукции, повышении расхода материала или инструмента и т.д. источник проблемы чаще всего ищут старыми методами, схожими с методом проб и ошибок (МПиО, Э. Торндайк, 1898). На рисунке 1 представлена схема действий этого метода [1].

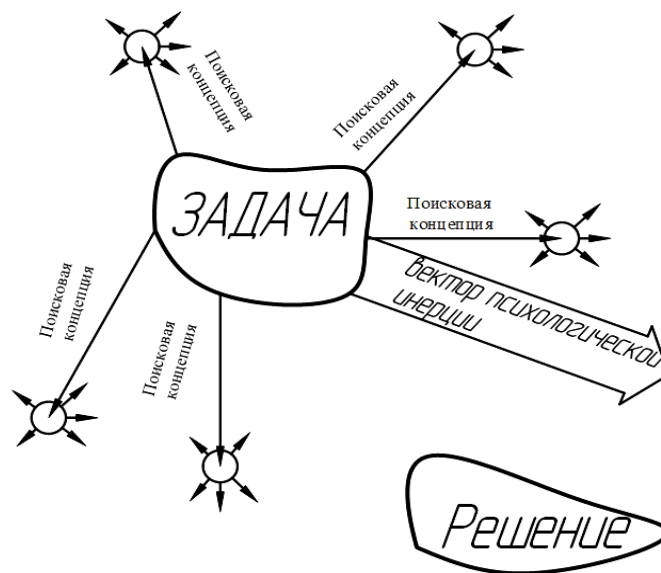


Рисунок 1. – Схема метода проб и ошибок  
(от точки «Задача» рядом умственных действий вдоль выделенных поисковых концепций  
нужно попасть в точку «Решение»)

Одно из достоинств этого метода состоит в том, что ему практически не надо учиться, он инстинктивно понятен. В большинстве случаев (по умолчанию) человек стремится находить решение проблемы именно этим методом (при относительно малой эффективности его применения). В то же время существуют другие, более действенные, методы стимулирования мышления, направленные на совершенствование творческого процесса и самообразование. Данные методы широко применяются преимущественно в прогнозировании, изобретательстве, системном инженерном проектировании [2].

В представляемой работе рассмотрены основные эвристические методы стимуляции мышления в ходе решения тех или иных задач и перспективы их использования в условиях производства.

*Анализ исследований.* Эвристические методы – это система принципов и правил, которые задают наиболее вероятностные стратегии и тактики деятельности решающего, стимулирующие его интуитивное мышление в процессе решения, генерирование новых идей и на этой основе существенно повышающие эффективность решения творческих задач определенного класса [3].

Среди множества эвристических методов наиболее интересные с точки зрения прямого применения на производстве являются методы, разработанные в 1942 г. швейцарским астрофизиком Ф. Цвикки [4–7]. Он предложил использовать три основных метода, совокупность которых получила название морфологического подхода [6]: 1) метод отрицания и конструирования; 2) метод систематического покрытия поля; 3) метод морфологического ящика.

Цель морфологического исследования – увидеть перспективу полного «поля знаний» о предмете [4–7]. Предложенный подход наименьшими усилиями позволяет обработать и систематизировать нужную информацию о проблеме и предложить варианты решений, которые впоследствии окажутся наилучшими [6].

Метод отрицания и конструирования состоит из следующих этапов (подано с точки зрения решения конструкторской задачи) [1; 7–9]:

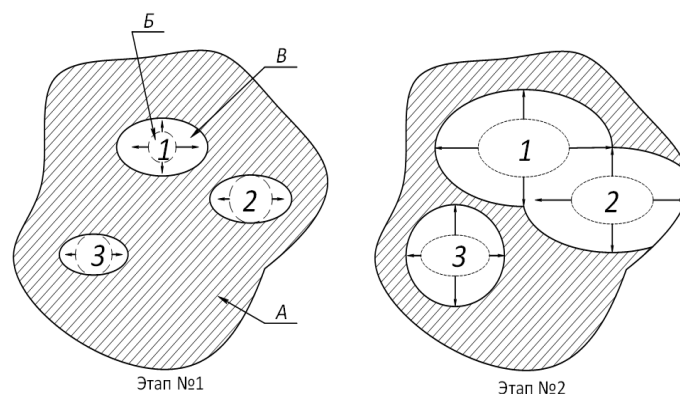
1) выявление в конструируемом объекте отдельных признаков, элементов, характеристик, свойств, которые являются важными для исполнения главного предназначения объекта (порой достаточно выявить только одну позицию);

2) отрицание одного из признаков с одновременной заменой его на иной. Здесь не обязательно брать противоположные значения выбранного признака, можно выбрать другое, совершенно неожиданное, значение (например, часы показывают не время, а фазы луны и т.п. [7]);

3) сначала мысленное (в настоящее время удобнее выполнять компьютерное) проектирование, а потом и реальная реализация конструкции с замененными характеристиками признака.

Данный метод удобен при конструировании объектов с нуля, таких, которых на рынке раньше вообще не было, неожиданных, возможность коммерческой реализации которых может быть парадоксальной (примеров тому много: хула-хуп, трубочка для коктейлей, зонтик для мороженого, спинер, электросамокат и пр.).

Метод систематического покрытия поля (знаний) является «детективным» методом [7]. Именно с его помощью Ф. Цвикки (и не только им) сделано большинство открытий в астрофизике. Вначале в осваиваемом поле знаний у каждого человека имеется несколько открытых «вех» (кружочки 1–3, рисунок 2). На каждом этапе исследователь открывает новые «вехи» («расчищенные» от штриховки области В, рисунок 2). Так, постепенно находят связи между известными «вехами» (вехи 1, 2, этап 2, рисунок 2) и заодно открываются новые, пока неизвестные, области знаний, между которыми, возможно, существует связь (например, почему изменение одного параметра приводит к изменению другого и в какой мере). Каждый этап метода дает ограниченное количество информации, но именно так сейчас движется наука.



**А** – поле знаний, необходимое к освоению (открытию);  
**Б** – начальные «вехи» знаний, которые были известны на нулевом этапе освоения поля знаний;  
**В** – «вехи» знаний, открываемые после каждого этапа (шага) освоения поля знаний

Рисунок 2. – Схема метода систематического покрытия поля знаний



Из указанных методов Цвикки метод морфологического ящика наиболее алгоритмизирован и доступен для понимания большинству специалистов любой отрасли знаний [6; 7]. Кроме того, данный метод позволяет объединить для совместного использования другие эвристические методы, облегчая решение проблемы [7].

Метод морфологического ящика состоит из следующих основных шагов (подано с точки зрения решения конструкторской задачи) [6; 7]:

1) формулировка проблемы. При этом необходимо посмотреть, какие объекты подобного назначения известны и какими они могут быть, такие объекты. Количество слов в формулировке «названия» проблемы не должно смущать разработчика [7];

2) выделение в конструируемом объекте отдельных элементов, несущих определенный функционал, и определение нужных характеристик каждого выделенного элемента (например, источник света, регулятор интенсивности светового потока, элементы защиты (изоляция) и т.д.). Здесь можно применить метод систематического покрытия поля знаний;

3) конструирование морфологического ящика, или многомерной матрицы (таблица 1), содержащей возможные решения для каждого из выделенных элементов конструируемого объекта (здесь удобно использовать метод мозгового штурма). Морфологическая таблица строится так: левый столбец заполняется наименованиями конструктивных элементов, а затем к каждой клетке этого столбца справа пристраивается столько клеток, сколько нужно для размещения всех вариантов реализации данного конструктивного элемента (возможные формы конструкции отдельного элемента; варианты подведения питания используемой энергии; виды крепления конструкции в целом или отдельных элементов и пр.) [7];

4) анализ и оценка решений с точки зрения целей, которые должны быть достигнуты (перебираются все возможные сочетания разных вариантов выделенных элементов разрабатываемой конструкции);

5) выбор наиболее рационального решения готовой конструкции.

Таблица 1. – Пример исполнения морфологического ящика [7]

Выделенный параметр или элемент проектируемой конструкции	Возможные варианты решения параметра или элемента проектируемой конструкции		
А	А1	А2	А3
Б	Б1	Б2	–
В	В1	В2	В3
Г	Г1	Г2	Г3

*Основной материал.* Метод морфологического ящика удобен для применения на любом производстве при разрешении ситуаций, которые не поддаются исправлению из-за неясности причин их возникновения. Например, при возникновении систематического (или периодически возникающего) брака продукции у руководящего и инженерного персонала возникает несколько мнений и, заиклившись на одном из них, люди не видят ошибочности выдвигаемых предположений. Бывает, человек, пришедший со стороны (но имеющий достаточные знания и опыт), при ознакомлении сразу находит решение возникшей проблемы. Причем решение находится не из-за того, что данный человек (это может быть даже не инженерный работник) имеет более глубокие знания и опыт в данном направлении, а из-за отсутствия в его мыслительном процессе уже принятого всеми вектора психологической инерции (см. рисунок 1).

Автор данной статьи сам наблюдал процесс, когда научно-технический спор, возникший между двумя профессорами, был разрешен студентом-заочником, случайно зашедшим на пересдачу экзамена к одному из них.

При решении проблем, связанных с нахождением причин возникновения брака, концепция применения метода морфологического ящика должна выглядеть следующим образом:

1) несколькими предложениями следует охарактеризовать проблему (брак такой-то продукции, возникающий с такой-то периодичностью на таком-то оборудовании, работающем в таком-то режиме, после такой-то производственной операции, в таком-то цеху, и т.п.). Количество предложений в тексте названия не должно смущать. Иногда уже после написания на листе расширенного названия проблемы ситуация становится намного яснее и разрешается сразу же;

2) методом мозгового штурма выявить факторы, которые могли бы привести к возникновению брака. Важно собрать для штурма не только представителей руководящего и инженерного персонала, но и мастеров, несколько рабочих (имеющих достаточный уровень знаний и опыт); также должны присутствовать несколько человек смежных профессий (например, не только технологи, но и механики,

и энергетики). Следует заметить, что нельзя отметить любые, даже кажущиеся нелепыми, мнения (в меру здравого смысла);

3) далее идет конструирование морфологического ящика. Предлагается к использованию следующий его вид (таблица 2);

4) анализ и оценка результатов.

Таблица 2. – Пример морфологического ящика, составленного для выявления причин возникновения брака

Возможные причины брака	Методы контроля	Ответственный персонал или руководящий группой	Срок исполнения
А	А1 (описываются основные особенности конкретного метода)	Иванов И.И.	(указывается крайний срок вынесения решения)
	А2	Петров В.П.	00.00.000
Б	Б1	Сидоров С.Д.	00.00.000
Г	Г1	Чибурелла Я. И.	00.00.000
Д	Д1	Петров И.П.	00.00.000

Данный метод может быть использован не только для нахождения причин возникновения брака. Например, он был применен на одном из металлургических предприятий, занимающихся холодной прокаткой труб из особо прочных сплавов. Проблемой был не брак труб, а внезапное повышение изнашивания рабочего инструмента. В качестве рабочего инструмента использовались калибры-полудиски и конические оправки. Расход калибров-полудисков и оправок на станах холодной пильгерной валковой прокатки увеличился в разы. Калибры принимали крайнюю степень износа после прокатки от 200 до 500 м труб вместо 1500–2000 м. Примерно такое же увеличение расхода было и у оправок. Для решения проблемы была созвана группа, состоящая из руководителей разного уровня, инженерно-технических работников и рабочих высокой квалификации. В результате ее работы составлена подробная таблица (таблица 3).

Таблица 3. – Пример морфологического ящика, составленного для выявления причин повышенного износа инструмента\*

Возможные причины понижения стойкости рабочего инструмента	Способы выявления	Ответственный персонал, или руководящий группой	Срок исполнения
Компоненты эмульсии, охлаждающей зону деформации	А1	Иванов И.И.	00.00.000
	А2	Петров В.П.	00.00.000
Калибровка рабочего инструмента	Б1	Сидоров С.Д.	00.00.000
Брак заготовок под шлифовку рабочего инструмента (марка стали, закалка, поставщик и пр.)	В1	Чибурелла Я.И.	00.00.000
Понижение температуры воздуха (происшествие случилось в зимний период)	Г1	Петров И.П.	00.00.000
Брак изготовления ручья калибров в цеху (ручей шлифовался на специальных станках двух типов: ЧПУ и старой конструкции)	Д1	Иванов И.И.	00.00.000

\* приведена не вся информация

До этого причину не удавалось выяснить на протяжении полугода. В итоге в течение недели было выявлено, что причиной стал один из компонентов смазки (в два раза превышена, чем установлено ГОСТом, фракция помола). Виноваты поставщик сырья и менеджер, совершивший закупку. Менеджер не имел достаточного уровня знаний для принятия решений, связанных с закупкой сырья для такого типа производства. Поставщик навязал ему заранее неправильное решение.

**Выводы.** Выполнен обзор основных эвристических методов стимуляции мышления в ходе решения тех или иных задач. Проиллюстрировано применение одного из этих методов в условиях промышленного производства. Определено, что из рассмотренных методов Цвикки метод морфологического ящика наиболее алгоритмизирован и доступен для понимания большинству специалистов любой отрасли знаний. Приведены схемы решения проблем данным методом с целью выявления причин возникновения брака и повышенного износа рабочего инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенова, И.Н. Метод проб и ошибок как средство формирования универсальных учебных действий / И.Н. Семенова, Н.Н. Нигматуллина // Личность, семья и общество: вопросы педагогики и психологии : сб. ст. по материалам XVI междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2012. – Ч. II. – С. 22–31.
2. Валькова, Н.П. Эффективность применения методов эвристики в процессе обучения дизайнеров [Электронный ресурс] / Н.П. Валькова // Вестн. СПбГУ. Сер. 15, Искусствоведение. – 2015. – №1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-metodov-evristiki-v-protssesse-obucheniya-dizaynerov>. – Дата доступа: 25.08.2019.
3. Методы и приемы творческого разрешения проблем [Электронный ресурс] // Информационный портал. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/7\\_136081\\_metodi-i-priemi-tvorcheskogo-razresheniya-problem.html](https://studopedia.ru/7_136081_metodi-i-priemi-tvorcheskogo-razresheniya-problem.html). – Дата доступа: 27.08.2019.
4. Ильин, В.Н. Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика / В.Н. Ильин, А.В. Лепехин // Тр. МАИ. – 2011. – № 46. – С. 1–11.
5. Ritchey T. On a morphology of theories of emergence / T. Ritchey // Acta Morphologica Generalis. – 2014. – № 3, vol. 3.– С. 1–16.
6. Умнов, В.А. Формирование вариантов развития городской подземной транспортной инфраструктуры [Электронный ресурс] / В.А. Умнов, А.В. Харченко // ГИАБ. – 2005. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-variantov-razvitiya-gorodskoy-podzemnoy-transportnoy-infrastruktury>. – Дата доступа: 27.08.2019.
7. Морфологический подход : учеб. пособие / В.В. Титов. – М. : ВНИИПИ, 1990. – 39 с.
8. Бирюков, А.Н. Модификации морфологического моделирования для задач планирования при позаказной системе производства однотипной продукции [Электронный ресурс] / А.Н. Бирюков // Статистика и экономика. – 2011. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsii-morfologicheskogo-modelirovaniya-dlya-zadach-planirovaniya-pri-pozakaznoy-sisteme-proizvodstva-odnotipnoy-produktsii>. – Дата доступа: 29.08.2019.

Поступила 12.12.2019

#### APPLICATION OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS METHODS TO MAKE OPTIMAL TECHNICAL DECISIONS

S. PILIPENKO

*In the work, the analysis of the main heuristic methods of stimulating mental thinking in the course of solving certain problems and the further development of these methods in order to expand the possibilities of their application in the production environment is performed. The concept of using the morphological box method to solve specific production problems is considered. An example of identifying the causes of marriage by this method is given. The article can be interesting and useful for students of technical universities, as well as graduate students, practicing engineers and managers at various levels.*

**Keywords:** technical problem, solution methods, Zwicky methods, black box method.

УДК 621.91.01

**ДЕФОРМАЦИЯ И СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ И КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ  
ВРАЩАЮЩИМСЯ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ  
НА ТОКАРНЫХ И ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены схемы обработки и формулы для расчета коэффициентов утолщения, укорочения и уширения стружки, нормальной силы и силы трения, работы деформации и трения. Проведен анализ этих схем и формул и установлены зависимости характеристик процесса резания от изменения угла наклона режущей кромки инструмента.*

**Ключевые слова:** образование стружки, деформация, коэффициент усадки стружки, сила резания, составляющие силы резания, работа и мощность резания.

**Введение.** При механической обработке поверхностей деталей большое значение имеют величины деформации срезаемого слоя, совершаемой при этом работы и потребляемой мощности приводом станка. Особенно актуален учет этих величин при обработке на станках с ЧПУ, для которых характерен нестационарный процесс резания с изменяющимися во времени кинематическими и динамическими показателями. Как правило, современные станки с ЧПУ позволяют фиксировать мощность в процессе резания и корректировать элементы режима резания. Дополнительные возможности по управлению процессом резания обеспечивает применение режущих инструментов с кругонаклонной режущей кромкой [1]. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки плоских и криволинейных поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом (фрезы) на деформационные характеристики процесса резания в настоящее время изучены недостаточно.

**Основная часть.** Рассмотрим процесс превращения срезаемого слоя в стружку при резании инструментом с углом  $\lambda \neq 0$ , при котором каждая точка режущей кромки работает с одинаковым по величине и направлению вектором истинной скорости резания, одинаковой толщиной срезаемого слоя и постоянной величиной кинематического угла наклона главной режущей кромки [1] применительно к схеме резания, представленной на рисунке 1 [2].

Если считать, что обрабатываемый материал абсолютно недеформируем, то при перемещении инструмента из положения  $ap$  в положение  $cd$  на расстояние  $L$  развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки представляет собой параллелограмм  $apcd$  с основанием, равным рабочей длине режущей кромки  $b$ , и высотой, равной расстоянию по нормали  $L_N$  между положениями режущей кромки. Боковые стороны параллелограмма, определяющие направление схода стружки по передней поверхности инструмента, составляют с нормалью к режущей кромке угол, равный углу наклона главной режущей кромки  $\lambda$ .

При резании реального материала в результате деформирования срезаемого слоя развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки в первом приближении представляет параллелограмм  $a_2p_2cd$  с основанием, равным рабочей длине режущей кромки, и высотой  $L_{CN}$ , меньшей, чем расстояние по нормали  $L_N$ . Стороны этого параллелограмма образуют с перпендикуляром к режущей кромке угол  $\eta$ , в общем случае не равный углу  $\lambda$ .

Как показал А.А. Брикс [3], превращение параллелограмма  $apcd$  в параллелограмм  $a_2p_2cd$  может быть объяснено следующим образом. Движение любой точки наклонной режущей кромки в направлении вектора скорости резания  $\vec{v}_r$  может быть представлено состоящим из двух движений: в направлении, нормальном к режущей кромке, определяемого вектором  $\vec{v}_N$ , и в другом – параллельном режущей кромке, определяемого вектором  $\vec{v}_T$ .

При перемещении в направлении, нормальном к режущей кромке, на расстояние  $L$  отдельные слои металла толщиной  $\Delta x$ , деформируясь по плоскости сдвига в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, вызовут укорочение срезаемого слоя до размера  $L_{CN}$ . При перемещении вдоль режущей кромки на расстояние  $L_T$  слои образовавшейся стружки, параллельные режущей кромке, увлекаемые передней поверхностью инструмента, сдвинутся вдоль режущей кромки так, что верхний край стружки переместится на расстояние  $\Delta L_{CT}$ .

Сдвиг слоев стружки вдоль режущей кромки легко подтверждается следующим. Если на верхней плоскости срезаемого слоя нанести риску  $ep$ , перпендикулярную к режущей кромке инструмента, то на срезанной стружке эта риска займет положение  $ep_2$ , отклонившись от перпендикуляра к режущей кромке в направлении вектора скорости  $\vec{v}_T$  на угол  $\chi$ .

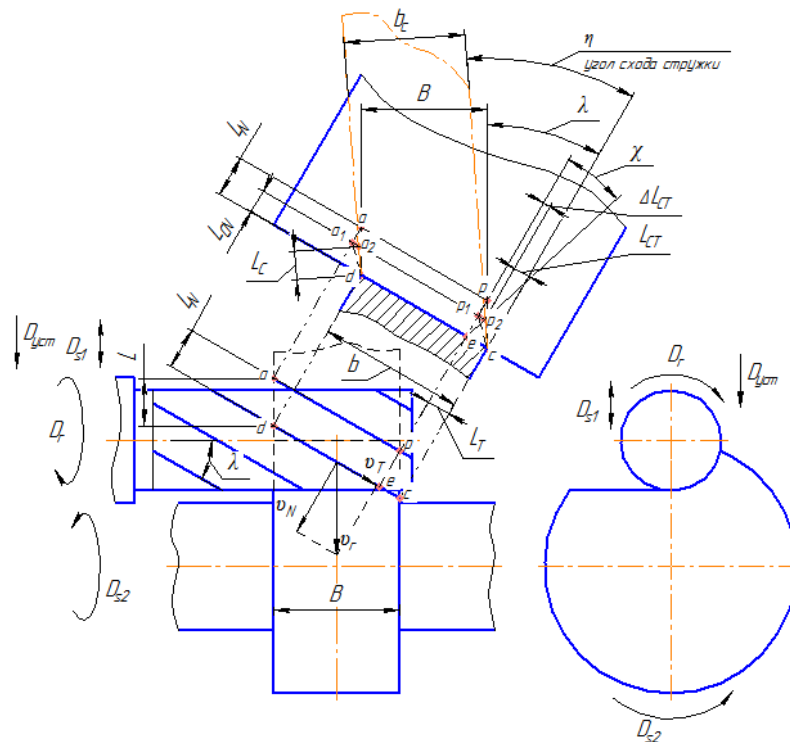


Рисунок 1. – Схема образования стружки при резании инструментом с углом  $\lambda \neq 0$

В результате одновременного суммарного воздействия на срезаемый слой двух перемещений срезанная стружка будет характеризоваться следующими размерами: нормальной длиной  $L_{cN}$ , толщиной  $a_c$ , шириной  $b_c$  и углом схода стружки  $\eta$  по передней поверхности. Степень конечного формоизменения срезаемого слоя, превратившегося в стружку, можно оценить соответствующими коэффициентами деформаций: степень деформации стружки в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, – коэффициентом нормального укорочения  $K_{IN}$ ; степень деформации в направлении, перпендикулярном к контактной поверхности стружки, – коэффициентом утолщения  $K_a$ ; степень деформации в направлении, перпендикулярном к боковой стороне стружки, – коэффициентом уширения  $K_b$ .

Согласно рисунку 1 коэффициент нормального укорочения стружки равен

$$K_{IN} = \frac{L_N}{L_{cN}}. \quad (1)$$

Из рисунка 1 также следует, что

$$L = \frac{L_N}{\cos \lambda}, \quad L_c = \frac{L_{cN}}{\cos \eta}.$$

Тогда

$$K_l = \frac{L}{L_c} = \frac{L_N}{L_{cN}} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda} \text{ или } K_l = K_{IN} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}. \quad (2)$$

Коэффициент утолщения стружки

$$K_a = \frac{a_c}{a}. \quad (3)$$

Коэффициент уширения стружки

$$K_b = \frac{b_c}{B}, \quad (4)$$

где  $B$  – расстояние по нормали между боковыми сторонами идеальной недеформированной стружки, равное ширине срезаемого слоя.

Коэффициент уширения стружки может быть выражен через угол наклона режущей кромки и угол схода стружки:

$$b_c = K \cdot b \cdot \cos \eta,$$

где  $K$  – коэффициент уширения стружки вдоль режущей кромки,  $K > 1$ .

Т.к.  $b = \frac{B}{\cos \lambda}$ , то  $b_c = K \cdot B \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}$ . Отсюда

$$K_b = K \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}. \quad (5)$$

Если в уравнении (5) принять  $K = 1$ , то получим известную формулу М.Е. Мерченга [4].

Согласно методике определения нормальной силы  $N$ , силы трения  $F$  и ее составляющих  $F_N$  и  $F_T$  [1], рассмотрим схему обработки (рисунок 2), где  $N$  – нормальная сила;  $F_N$  – нормальная сила трения (проекция полной силы трения на нормальную плоскость);  $F_T$  – касательная сила трения;  $P_Z'$  – часть главной составляющей силы резания  $P_Z$ ;  $F_{1Z}$  – сила трения, действующая на поверхности резания вдоль оси  $Z$  в сторону, обратную рабочему движению инструмента.

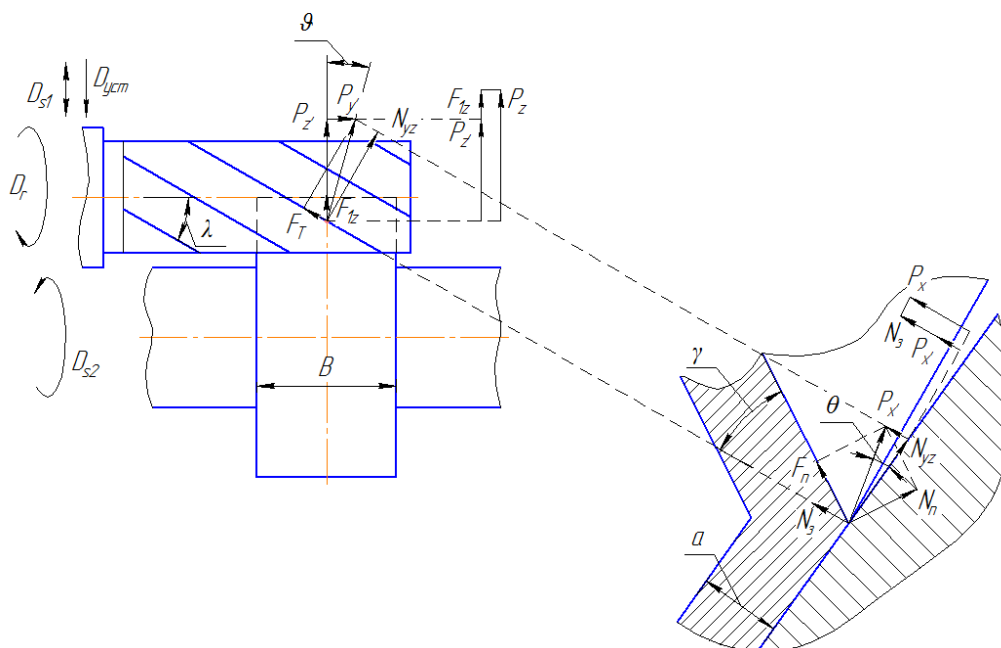


Рисунок 2. – Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом  $\lambda \neq 0$

Часть главной составляющей силы резания  $P_Z$

$$P_Z' = P_Z - F_{1Z}. \quad (6)$$

Часть силы подачи  $P_X$

$$P_X' = P_X - N_1. \quad (7)$$

Вспомогательный угол  $\vartheta$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P_Y}{P_Z}. \quad (8)$$

Нормальная к режущей кромки сила  $N_{YZ}$ , действующая вдоль поверхности резания,

$$N_{YZ} = P_Z' \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (9)$$

Вспомогательный угол  $\theta$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_X'}{N_{YZ}}. \quad (10)$$

Нормальная к передней поверхности силы  $N$

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \cos(\theta + \gamma). \quad (11)$$

Нормальная сила трения  $F_N$

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \sin(\theta + \gamma). \quad (12)$$

Касательная сила трения  $F_T$

$$F_T = P_z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \quad (13)$$

Угол между нормальной и полной силой трения  $\eta$

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_T}{F_N} \quad (14)$$

Полная сила трения  $F$

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta} \quad (15)$$

Средний коэффициент трения  $\mu$

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (16)$$

Минутная работа резания достаточно точно определяется уравнением

$$E = E_\theta + E_{T,n} + E_{T,z} \quad (17)$$

где  $E_\theta$  – минутная работа деформации;  
 $E_{T,n}$  – минутная работа трения на передней поверхности;  
 $E_{T,z}$  – минутная работа трения на задней поверхности.

Удельная работа резания

$$e = e_\theta + e_{T,n} + e_{T,z}.$$

Удельная работа резания и каждая ее составляющая находятся делением минутной работы на минутный объем срезаемого слоя, равный произведению  $aBv$  (рисунок 3).

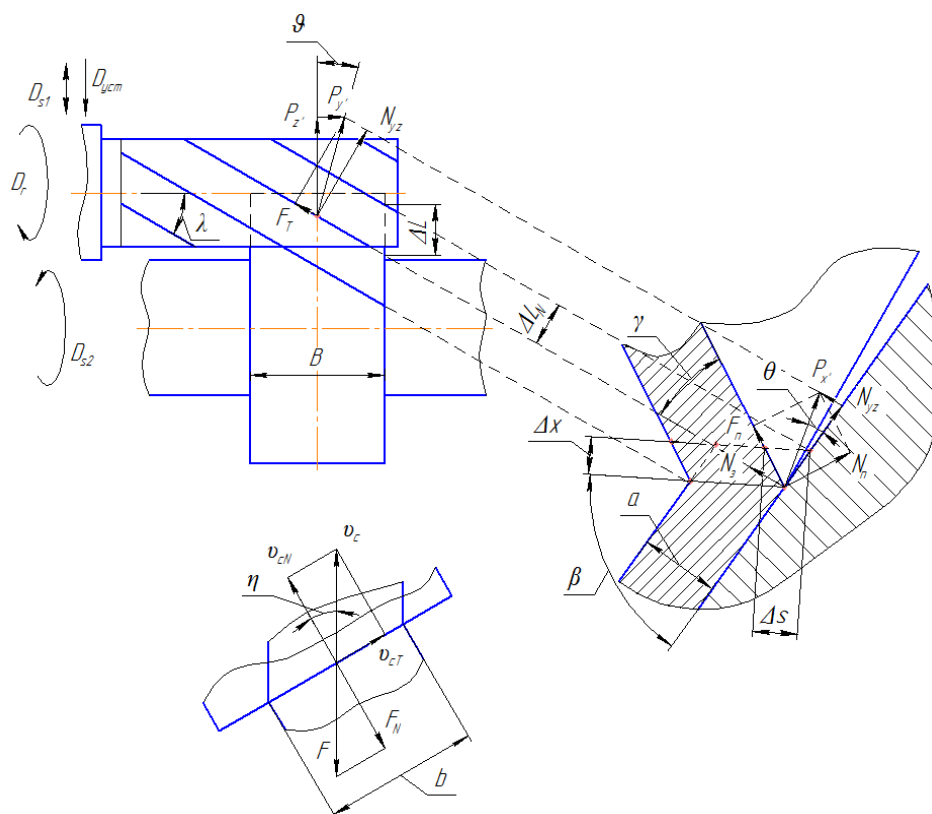


Рисунок 3. – Схема для определения составляющих работы резания инструментом с углом  $\lambda \neq 0$

Работа деформации состоит из двух частей:

$E_{\theta N}$  – работы, соответствующей перемещению инструмента в направлении, перпендикулярном к режущей кромке;

$E_{\theta T}$  – работы, соответствующей перемещению инструмента вдоль режущей кромки.

Работа простого сдвига под углом  $\beta$  в направлении, перпендикулярном к режущей кромке,

$$E'_{\partial N} = P_{\tau} \cdot \Delta s, \quad (18)$$

где  $P_{\tau}$  – сила сдвига;

$\Delta s$  – величина сдвига на плоскости сдвига, соответствующая перемещению режущей кромки инструмента на расстояние  $\Delta L_N$ .

Величина сдвига

$$\Delta s = \Delta L_N \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}.$$

Тогда

$$E'_{\partial N} = P_{\tau} \cdot \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (19)$$

Минутная работа деформации

$$E_{\partial N} = P_{\tau} \cdot v \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}, \quad (20)$$

где  $P_{\tau} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta}$ ;

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P'_Y}{P'_Z},$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P'_X}{P'_Z} \cdot \frac{\cos \vartheta}{\cos(\lambda - \vartheta)}.$$

Окончательно получаем:

$$E_{\partial N} = P'_Z \cdot v \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta}. \quad (21)$$

Работа простого сдвига вдоль режущей кромки

$$E'_{\partial T} = P_T \cdot \Delta T_c, \quad (22)$$

где  $\Delta T_c$  – сдвиг стружки вдоль режущей кромки, соответствующий перемещению инструмента на расстояние  $\Delta L_N$ ,

$$\Delta T_c = \Delta L_N \cdot \operatorname{tg} \lambda - \Delta L_{CN} \cdot \operatorname{tg} \eta,$$

где  $\Delta L_{CN}$  – длина стружки, соответствующая перемещению инструмента на расстояние  $\Delta L_N$ ,

$$\Delta L_{CN} = \Delta L_N \cdot \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \cdot \frac{\cos \lambda}{K_{IN}},$$

$$\Delta L_{CN} = \frac{\Delta L}{K_I} \cdot \cos \eta.$$

Окончательно:

$$\Delta T_c = \Delta L \cdot \left( \sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right). \quad (23)$$

Минутная работа деформации

$$E_{\partial T} = P'_Z \cdot v \cdot \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left( \sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right). \quad (24)$$

Суммарная минутная работа деформации

$$E_{\partial} = P'_Z \cdot v \cdot \left[ \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left( \sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) \right], \frac{\text{кГм}}{\text{мин}}. \quad (25)$$

Удельная работа деформации

$$e_{\partial} = \frac{P'_Z}{aB} \cdot \left[ \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left( \sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) \right] \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}}. \quad (26)$$

Работа трения на передней поверхности

$$E_{T,n} = F \cdot v_c. \quad (27)$$



Сила трения

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}, \quad (28)$$

где  $F_N = P_Z \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta}.$  (29)

Скорость движения стружки

$$v_c = \frac{v}{K_l}. \quad (30)$$

Минутная работа на передней поверхности

$$E_{T.n} = P_Z \cdot v \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta}, \frac{\text{кГм}}{\text{мин}}. \quad (31)$$

Удельная работа трения на передней поверхности

$$e_{T.n} = \frac{P_Z}{aB} \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}}. \quad (32)$$

Минутная работа на задней поверхности

$$E_{T.z} = E - (E_o + E_{T.n}). \quad (33)$$

Удельная работа трения на задней поверхности

$$e_{T.z} = e - (e_o + e_{T.n}) \cdot 10^{-3}, \text{кГм/мм}^3. \quad (34)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (6)–(34), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) вращающейся детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Ширина обрабатываемой поверхности составляет 20 мм, глубина резания – 3 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материалом заготовки служит конструкционная сталь с  $\sigma_B = 600$  МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 16 мм, скорость резания принимается равной 100 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, можно рассчитать главную составляющую силы резания  $P_z$  по общепринятой формуле  $P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot s^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}} \cdot K_{pz}$  [5]. При определении влияния угла наклона режущей кромки  $\lambda$  на процесс резания принимается следующее соотношение составляющих силы резания:  $P_x = 0,3P_z$  и  $P_y = 0,5P_z$ ;  $P_x = 0$  и  $P_y = 0$ .

Результаты расчетов представлены в виде фрагментов графиков на рисунках 4 и 5.

Если учитываются все три составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ , то согласно выражению (8) изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла  $\vartheta$ . В свою очередь, угол  $\vartheta$ , входящий в выражение (9), влияет на значение угла  $\lambda$ , уменьшая или увеличивая его значения. Это изменение  $\lambda$  в зависимости от заданных условий резания (в нашем случае  $\lambda = 0 \dots 27^\circ$ ) приводит к некоторому снижению нормальной силы  $N$  (рисунок 4). Если учитывается только тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$ , которая имеет наибольшее значение по сравнению со значениями  $P_x$  и  $P_y$ , то при  $\lambda = 0^\circ$  нормальная сила  $N$  имеет максимальное значение, и по мере увеличения значения  $\lambda$  (от 0 до  $90^\circ$ ) значения  $N$  уменьшаются до 0 (рисунок 5).

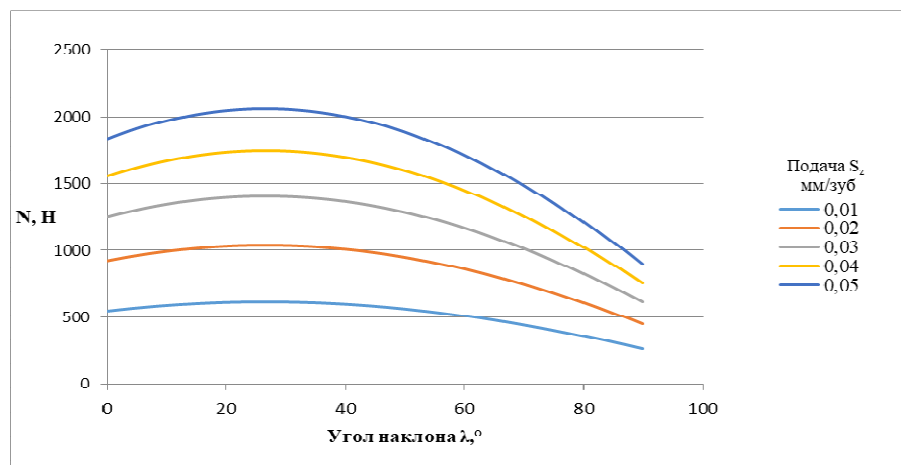


Рисунок 4. – Влияние угла наклона режущей кромки  $\lambda$  на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания  $P_x = 0,3P_z$  и  $P_y = 0,5P_z$

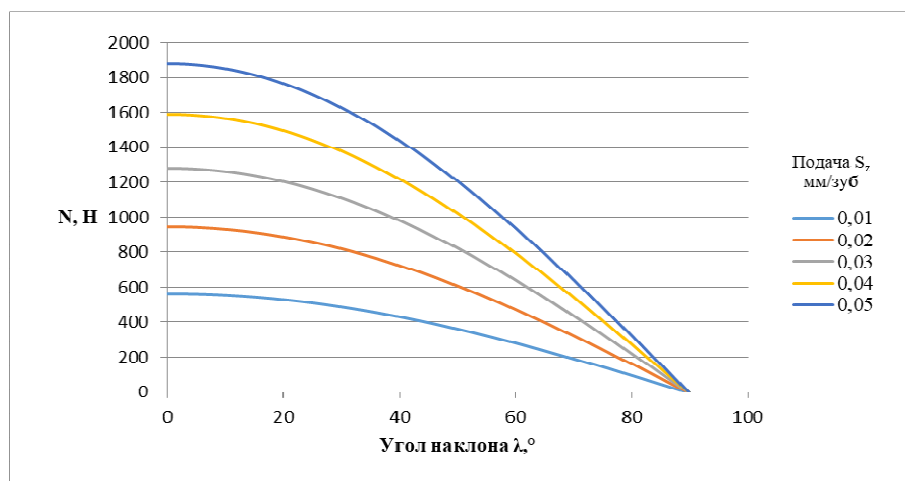


Рисунок 5. – Влияние угла наклона режущей кромки  $\lambda$  на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания  $P_x = 0$  и  $P_y = 0$

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу  $N$  по выражению (11), на нормальную и касательную силы трения по (12), (13) с учетом углов  $\theta$  (выражение (10)) и  $\eta$  (выражение (14)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

**Заключение.** Выведенные формулы для расчета механических характеристик процесса резания позволяют учитывать зависимость силы резания от угла наклона режущей кромки для различных условий обработки – с увеличением угла наклона режущей кромки инструмента сила резания уменьшается. С учетом радиальной и осевой составляющих силы резания значения нормальной силы резания при малых значениях угла наклона режущей кромки ( $\lambda < 30^\circ$ ) несколько снижается. При больших значениях  $\lambda$  рекомендуется реализовывать кинематические схемы плунжерного фрезерования, ротационного резания и т.п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
2. Попок, Н.Н. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки / Н.Н. Попок, В.С. Анисимов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 31–38.
3. Брикс, А.А. Резание металлов (строгание) / А.А. Брикс. – СПб. : Тип. М.М. Стасюлевича, 1896. – 163 с.
4. Merchant, M.E. Basic Mechanics of the Metal Cutting Process / M.E. Merchant // Transactions of the ASME. – 1944. – Vol. 66.
5. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.

Поступила 10.01.2020

### DEFORMATION AND CHIP FORMATION WHEN PROCESSING FLAT AND CURVED SURFACES OF PARTS WITH A ROTATING CUTTING TOOL ON CNC LATHES AND MILLING MACHINES

*N. POPOK, V. ANISIMOV*

*Diagrams of processing and formulas for calculation of factors of thickening, shortening and widening of the chip, normal forces and friction, work of deformation and friction, the analysis of these diagrams and formulas and the dependence of the characteristics of the cutting process of changing the angle of inclination of the tool cutting edge.*

**Keywords:** *chip formation, deformation, chip shrinkage coefficient, cutting force, components of the cutting force, work and cutting power.*

УДК 621.926

## ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СТЕКЛОБОЯ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

канд. техн. наук Д.Н. БОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.А. ГАРАБАЖИУ,  
канд. техн. наук, доц. О.А. ПЕТРОВ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

канд. техн. наук, доц. Д.В. СЕМЕНЕНКО

(Филиал «Научно-технический центр» ОАО «НПО Центр», Минск)

*Исследуется сухой помол стеклобоя в эффективной планетарной мельнице. Дан анализ процесса переработки стекла в промышленности, оценены возникающие при этом проблемы. Показано, что это приведет к экономии как сырья, так и используемой при этом энергии. Описаны силовые воздействия, возникающие в планетарной мельнице. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению стеклобоя для разных комбинаций начальных параметров. На основании анализа фракционного состава измельченных продуктов даны рекомендации по рациональной загрузке помольных стаканов планетарной мельницы.*

**Ключевые слова:** планетарная мельница, измельчение, бой стекла, загрузка мельницы, объем стакана, мелющее тело, усилие, воздействие, фракционный состав.

**Введение.** В последнее время наиболее актуальной задачей в различных отраслях промышленности является переработка и утилизация отходов стекла. Переработанное стекло легко возвращается в производственный цикл при изготовлении различных видов листового и бутылочного стекла, теплоизоляционного волокна и иных строительных материалов на его основе. Помимо экономии сырья введение стекловолокна в состав стекольной шихты снижает ее температуру плавления и уменьшает время варки, что позволяет экономить до 10% электроэнергии, затрачиваемой на процесс.

В Республике Беларусь стеклобой применяется в сравнении с другими странами сравнительно недавно, поэтому рациональный подход к переработке сырья и использованию его в технологических целях достаточно актуален. Стекло относится к высокоабразивным материалам средней прочности, не меняющим своих свойств с увеличением влажности.

Одними из помольных агрегатов для тонкого измельчения стекла являются мельницы с шаровой загрузкой различных конструкций [1; 2], наиболее эффективные из них – планетарные мельницы.

Планетарные мельницы относятся к быстроходным измельчающим агрегатам барабанного типа. В отличие от классических шаровых их размольные барабаны вовлечены в сложное движение: вращение вокруг собственных осей и вокруг общей оси мельницы. Преобладающими силовыми факторами, влияющими на эффективность помола, в планетарных мельницах становятся инерционные силы, которые значительно превышают силу тяжести [3]. При этом инерционные силы представлены в виде двух составляющих. Одна из них связана с переносным движением барабана вместе с загрузкой, а вторая – с относительным движением самой загрузки. На протяжении одного оборота водила направление этих сил изменяется в разных фазах. Исходя из этого диапазон изменения динамических нагрузок в элементах конструкции планетарной мельницы также может быть довольно большим. Но одновременно такое изменение основных силовых факторов способствует усложнению траектории движения элементов загрузки. В совокупности со значительным увеличением модуля суммы инерционных сил прогнозируется и повышение эффективности измельчения материалов в планетарной мельнице. Это повышение подтверждено экспериментально [4]. Дисперсность продукта двенадцатичасового помола, полученная в барабанной мельнице, в планетарной достигается за 2 мин. Это обусловлено, прежде всего, комплексным воздействием таких разрушающих эффектов, как раздавливание, удар и истирание, и нестационарностью процесса воздействия мелющих тел на материал. Высокая эффективность измельчения в планетарных мельницах подтверждена и зарубежными исследователями [5; 6].

Данная работа – это продолжение исследований процесса помола стеклобоя в мельницах различных конструкций [7]. Цель экспериментальных исследований – изучение процесса помола в планетарной мельнице в зависимости от времени помола, а также процентного соотношения мелющих тел и измельчаемого стеклобоя. Эффективность помола оценивалась по фракционному составу, который был получен на рассеивающей машине фирмы Retsch AS 200 (Германия) с набором сит 20, 40, 80, 100 и 200 мкм.

**Основная часть.** В качестве объекта для экспериментальных исследований была выбрана вертикальная планетарная мельница периодического действия (рисунок 1) с максимальной угловой скоростью стаканов  $\omega = 140$  рад/с. Ее основные геометрические параметры помольных стаканов следующие:

$D_B = 120$  мм,  $L_B = 90$  мм, расстоянием между осями стаканов – 260 мм,  $k = 0,24$  и  $b = 1,7$ . Стаканы заполнялись мелющими телами и измельчаемым материалом в различном объемном соотношении.

Барабаны и шары являются важной частью конструкции планетарных мельниц, т.к. непосредственно принимают участие в помоле материала. Поэтому они должны выдерживать большие нагрузки, быть термически и химически устойчивыми и износостойкими. В связи с этим для проведения экспериментов применялись мелющие тела  $d_{шл} = 18$  мм, выполненные из стали ШХ15, и стаканы – из стали 45.

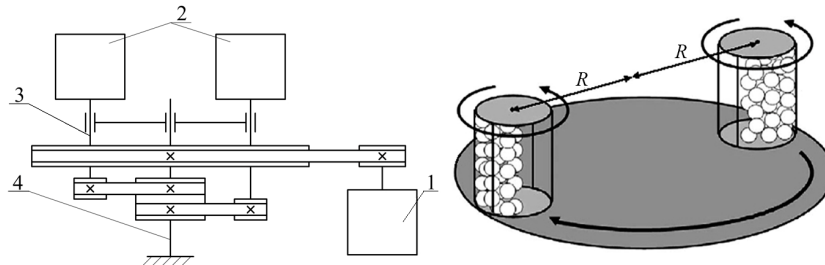
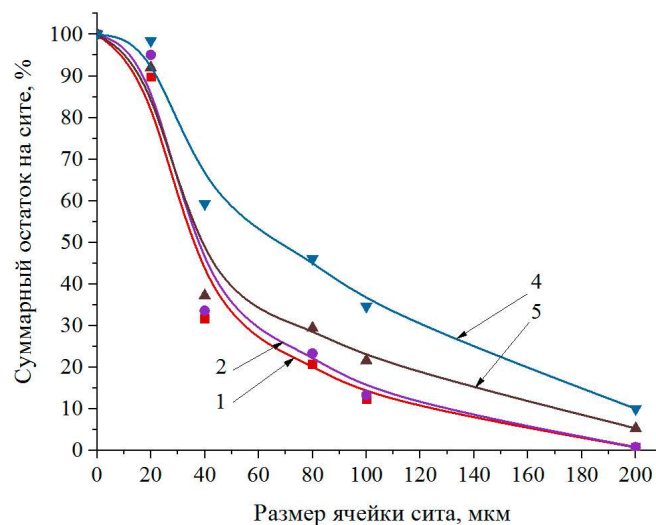


Рисунок 1. – Кинематическая схема планетарной мельницы

Помол стеклобоя осуществлялся в течение трех промежутков времени – 5, 10 и 15 мин, и при различном процентном соотношении мелющих тел к измельчаемому материалу – 1:1, 1:0,8; 1:0,5 и 1:0,3.

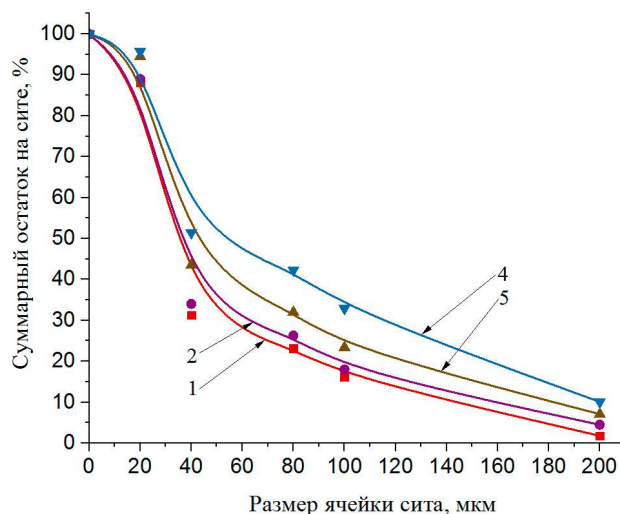
По результатам экспериментов были выполнены графические зависимости фракционного состава продукта для разных комбинаций начальных параметров (рисунки 2–4). Суммарную характеристику крупности материала в виде кривой строим «по плюсу», т.е. по суммарному остатку материала на ситах, начиная с самых крупных. При этом на оси абсцисс в масштабе откладывается размер отверстий сит, на которых производился ситовый анализ, а на оси ординат – суммарный остаток на ситах.

Из полученных графических зависимостей видно, что при увеличении степени заполнения измельчаемым продуктом помольных стаканов при фиксированном проценте мелющих тел тонина готового порошка увеличивается. Причем дисперсность готового продукта при соотношении 1:1 и 1:0,8 при 5 мин измельчения практически идентична (рисунок 2), заметные отличия наблюдаются только при помоле свыше 10 мин (рисунки 3 и 4). При степени заполнения 1:1 и 1:0,8 остаток на сите 200 мкм практически отсутствует и составляет в зависимости от времени 0,7–5,1%. В данном случае в помольном стакане на материал воздействуют большие раздавливающее, истирающее и ударное усилия. В то же время для соотношений 1:0,5 и 1:0,3 остаток повышается – 5,3–10,7%. Это связано с тем, что при меньшем количестве материала может наблюдаться отсутствие контакта с мелющими телами и, как следствие, не будет происходить его измельчение.



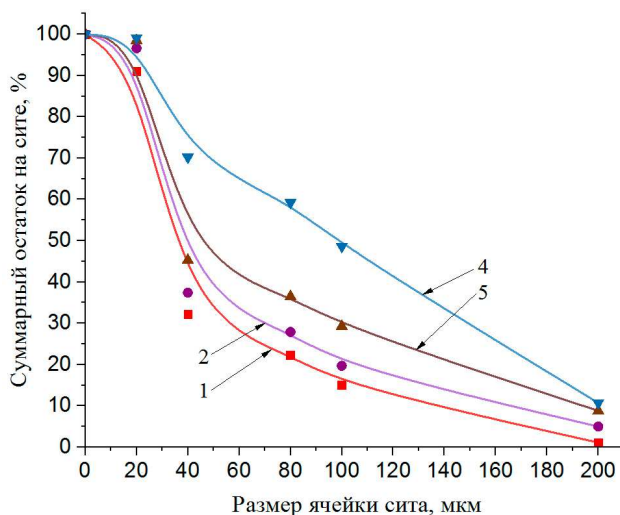
1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 2. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 5 мин



1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 3. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 10 мин



1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 4. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 15 мин

**Заключение.** Полученные результаты экспериментов позволили оценить эффективность процесса измельчения стеклобоя в планетарной мельнице. Построенные по экспериментальным данным графики наглядно показывают, что для достижения наибольшего процента частиц с размером меньше 100 мкм целесообразно применять соотношение мелющих тел к материалу как 1:1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Семенов, Д.В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Семенов ; Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – 20 с.
3. Вайтехович, П.Е. Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов / П.Е. Вайтехович, Д.Н. Боровский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 3–6.
4. Голосов, С.И. Центробежная планетарная мельница, ее технические возможности и применение в практике геологических исследований / С.И. Голосов, В.И. Молчанов // Физико-химические измельчения минералов в процессе сверхтонкого измельчения : сб. науч. ст. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1966. – С. 5–25.

5. Kompakt angebaute Planetenmühle zerkleinert kontamination frei // Maschinenmarkt. – 1997. – Jhrg. 103, no. 26. – P. 41.
6. Planeten-Kugelmuhlen // CITplus. – 2003. – Jhrg. 6, no. 7. – P. 33.
7. Гребенчук, П.С. Тонкое измельчение стеклобоя в мельницах различных конструкций / П.С. Гребенчук, Д.Н. Боровский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 79–83.

Поступила 18.11.2019

#### FINE GRINDING OF A GLASS BAR IN A PLANETARY MILL

**D. BOROVSKIY, A. HARABAZHYU, O. PETROV, D. SEMENENKO**

*Investigate the dry grinding of cullet in an efficient planetary mill. An analysis is given of the glass processing process in industry, and the problems arising from this are evaluated. It is shown that this will lead to savings both in raw materials and in the energy used for this. The force effects arising in a planetary mill are described. The results of experimental studies on the grinding of cullet for various combinations of initial parameters are presented. Based on the analysis of the fractional composition of the crushed products, recommendations are given on the rational loading of grinding glasses of a planetary mill*

**Keywords:** *planetary mill, grinding, glass breaking, mill loading, cup volume, grinding body, force, impact, fractional composition.*

УДК 621.926

## ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ ДЕЗИНТЕГРАТОРНОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ТОНИНОЙ ПОМОЛА

*д-р техн. наук, проф. П.Е. Вайтехович*  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Предложена методика расчета граничного размера частиц во встроенной классификационной камере измельчителя дезинтеграторного типа, основанная на анализе силовой схемы, включающей силу тяжести, инерции и аэродинамического воздействия. В последней учтено взаимодействие между частицами. Расчетным путем установлено влияние на граничный размер скорости газового потока, угла его ввода в сепарационную камеру. Даны рекомендации по оптимальным геометрическим и скоростным параметрам сепарационной камеры, намечены пути дальнейшей работы по исследованию данного агрегата.

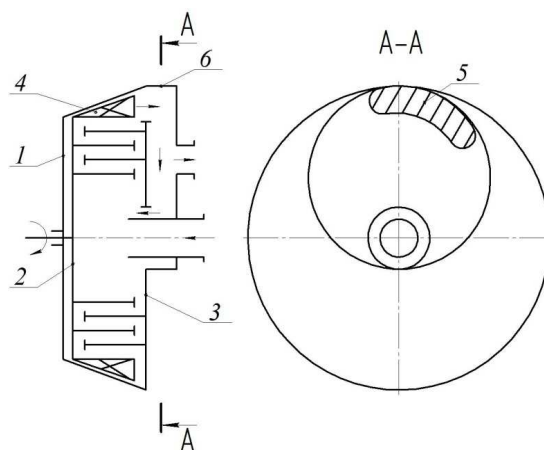
**Ключевые слова:** измельчитель, дисмембратор, классификационная камера, граничный размер, скорость, сила, расчет.

**Введение.** Измельчители ударного действия широко используются во многих отраслях промышленности. Их классификация и направление использования рассмотрены в работе [1]. Особое место среди ударных измельчителей занимают дезинтеграторы и дисмембраторы, приоритет в исследованиях которых принадлежит советскому специалисту И.А. Хингу [2]. Это так называемые многорядные бильные измельчители с высокой энергонапряженностью, характеризующейся многократным ударным воздействием рабочего органа на материал. Следует отметить широкий скоростной диапазон и соответствующую ему возможность использования таких агрегатов. При невысоких скоростях вращения ротора дезинтегратор может выполнять функцию смесителя и дробилки. Увеличение скорости трансформирует его в мельницу, причем с широчайшим спектром дисперсности конечного продукта: от грубого до сверхтонкого и даже коллоидного помола. Правда, при этом будут снижаться производительность агрегата и увеличиваться удельные энергозатраты на проведение процесса помола.

Увеличение дисперсности продукта с уменьшением скорости рабочего органа и одновременном снижении энергозатрат возможно при организации замкнутого цикла [3; 4]. Но при этом усложняется конструкция помольного агрегата, в его схеме появляется дополнительный выносной классификатор.

**Основная часть.** Применительно к агрегатам дезинтеграторного типа удалось обойти эту проблему путем компоновки измельчителя совместно с малогабаритным встроенным классификатором [5].

На рисунке 1 изображен такой дисмембратор с классификационной камерой.



1 – корпус; 2 – вращающийся ротор; 3 – торцевая крышка; 4 – лопасти; 5 – жалюзи;  
6 – обечайка классификационной камеры

Рисунок 1. – Дисмембратор с классификационной камерой

Он включает корпус 1 с установленным внутри вращающимся ротором 2, снабженным несколькими рядами коаксиально расположенных пальцев. Такие же пальцы прикреплены к торцевой крышке 3 корпуса. Создание воздушного потока, предназначенного для удаления материала из зоны помола, обес-

печивается лопастями 4, расположенными по внешней окружности ротора. В торцевой крышке 3 в зоне лопастей выполнено отверстие с поворотными жалюзи 5. Кольцевое отверстие в этой же крышке сделано и вокруг загрузочного патрубка. Зона отверстий закрыта обечайкой 6 с крышкой, в центре которой закреплен выходной патрубок для аэросмеси.

Таким образом, эксцентрично прикрепленная к корпусу дисмембратора обечайка с крышкой выполняет функцию своеобразного центробежного классификатора. Крупные части под воздействием центробежной силы движутся вблизи внутренних стенок обечайки и возвращаются через кольцевое отверстие в межпальцевое пространство на домол. Мелкие частицы вместе с потоком воздуха удаляются через выходной патрубок в виде аэросмеси.

В общем случае движение твердых частиц в вертикальной камере в закрученном газовом потоке рассматривается в цилиндрической системе координат [1; 6] и описывается системой уравнений

$$\begin{cases} m \left( \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\tau^2}{r} \right) = F_r, \\ m \left( \frac{dv_\tau}{dt} + 2 \frac{v_r v_\tau}{r} \right) = F_\tau, \\ m \frac{dv_z}{dt} = F_z - G, \end{cases} \quad (1)$$

где  $v_r, v_\tau, v_z$  – проекции скорости частиц на соответствующие оси координат;  
 $F_r, F_\tau, F_z$  – аналогичные проекции силы аэродинамического воздействия;  
 $m$  и  $G$  – соответственно масса и сила тяжести частиц.

Сила аэродинамического воздействия определяется скоростью обтекания, равной разности скоростей частицы и воздушного потока, и рассчитывается как

$$\vec{F} = \zeta S \frac{\rho_z}{2} |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v}), \quad (2)$$

где  $u$  – скорость газа;  
 $S$  – площадь сечения частицы;  
 $\rho_z$  – плотность газа;  
 $\zeta$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Сепарационная камера рассматриваемого измельчающего агрегата имеет свои особенности. Во-первых, она горизонтальная, с горизонтальной осью. Это означает, что сила тяжести будет действовать в радиальном и тангенциальных направлениях. Причем силу тяжести здесь обязательно нужно учитывать. В состоянии динамического равновесия при равенстве всех других сил она может иметь решающее значение. Во-вторых, длина камеры значительно меньше ее диаметра и движение по этой причине можно рассматривать в одной плоскости. Тогда система уравнений (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} m \left( \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\tau^2}{r} \right) = F_r \pm G_r, \\ m \left( \frac{dv_\tau}{dt} + 2 \frac{v_r v_\tau}{r} \right) = F_\tau \pm G_\tau. \end{cases} \quad (3)$$

Положительные значения проекция силы тяжести будет принимать для частиц, находящихся выше оси камеры, отрицательное – ниже.

На начальном этапе аналитических исследований стояла задача только в определении граничного размера (границы разделения) частиц в классификационной камере. Такие задачи успешно решаются с использованием принципа Даламбера, позволяющего переводить динамическую задачу в статическую. В связи с вышесказанным расчетная схема примет вид (рисунок 2).

Конструктивные особенности анализируемой сепарационной камеры показывают, что с точки зрения разделения частиц по размерам определяющим является их радиальное перемещение. Отсюда следует, что поставленную задачу можно решать только с использованием одного (первого) уравнения системы (3). Более того, граничный размер как в осевом, так и в закрученном потоке определяется из условия динамического равновесия сил, когда частица зависает в воздухе ( $v = 0$ ). При этом скорость обтекания становится равной скорости газа:

$$|u - v| = u. \quad (4)$$



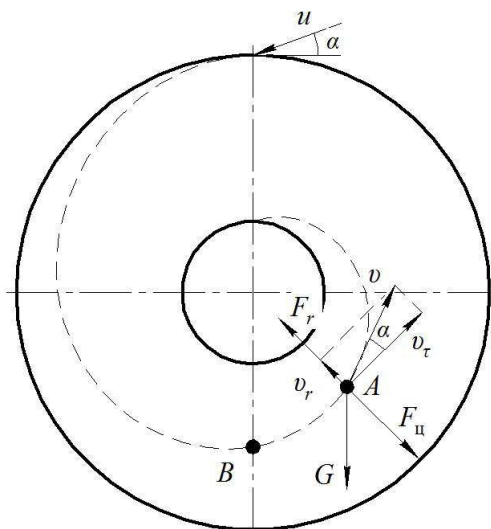


Рисунок 2. – Расчетная схема для определения граничного размера

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда частица находится в точке *B* на вертикальной оси под выходным патрубком. В этом положении направление силы тяжести *G* совпадает с направлением инерционной центробежной силы *F<sub>ц</sub>*. Эти две силы отбрасывают частицу к внешней стенке камеры. Радиальная составляющая силы аэродинамического воздействия увлекает ее к выходному патрубку. Условие динамического равновесия при этом

$$F_r \geq F_{ц} + G. \tag{5}$$

Проекция *F<sub>r</sub>* силы аэродинамического воздействия (2) с учетом условия (4) определится как

$$F_r = \zeta S \frac{\rho_z u_r^2}{2}. \tag{6}$$

Инерционная центробежная сила

$$F_{ц} = \frac{m u_{\tau}^2}{r}, \tag{7}$$

где *r* – текущий радиус.

С учетом того, что площадь поперечного сечения сферической частицы  $S = \pi d^2/4$ , ее масса  $m = \rho_m V = \rho_m \pi d^3/6$ , где *d* – диаметр частицы, условие динамического равновесия (5) примет вид

$$\frac{\zeta \pi d^2 \rho_z u_r^2}{8} = \frac{\rho_m \pi d^3}{6} \left( \frac{u_{\tau}^2}{r} + g \right). \tag{8}$$

После сокращений и преобразований получена формула для определения граничного размера

$$d = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_z}{\rho_m} \frac{u_r^2 r}{(u_{\tau}^2 + gr)}. \tag{9}$$

Ввиду небольших габаритов центробежной камеры можно принять, что интенсивность закрутки потока в ней не изменится. Тогда согласно схеме (см. рисунок 2) угол между вектором полной скорости частицы и ее тангенциальной составляющей  $\alpha = \text{const}$ . Он равен углу, под которым в сепарационную камеру вводится газовый поток со скоростью *u*. В этом случае проекции скорости газа

$$u_r = u \sin \alpha, \quad u_{\tau} = u \cos \alpha. \tag{10}$$

При движении частиц в газовом потоке всегда проблемным остается вопрос по расчету коэффициента аэродинамического сопротивления. Он зависит от режима обтекания и других факторов. Существуют универсальные зависимости, оценка применимости которых дана в работе [7]. Но вот такой фактор, как концентрация твердых частиц, в ней не учтен. Этому посвящены отдельные исследования [8] и по их результатам представлены рекомендации и расчетные зависимости.

Оценивая результаты указанных выше работ [7; 8], можно сделать вывод, что коэффициент аэродинамического сопротивления целесообразно рассчитывать по универсальной формуле

$$\zeta = 24 \operatorname{Re}^{-1} + 4 \operatorname{Re}^{-\frac{1}{3}}. \quad (11)$$

Учет концентрации твердых частиц при этом определяется через критерий Архимеда по зависимости

$$\operatorname{Re} = \operatorname{Ar}(1-c)^{4.75} \left( 18 + 0,6 \sqrt{\operatorname{Ar}(1-c)^{4.75}} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где  $c$  – объемная концентрация твердой фазы в газе.

Критерий Архимеда рассчитывается по формуле

$$\operatorname{Ar} = \frac{gd^3}{\nu} \left( \frac{\rho_m - \rho_g}{\rho_g} \right), \quad (13)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость несущей среды (газа);

$\rho_m$  – плотность измельчаемого материала.

Чтобы не усложнять расчетную зависимость (9) для граничного размера, достаточно внести в нее корректировку (10) по проекциям скорости газа. Тогда граничный размер

$$d = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_g}{\rho_m} \frac{u^2 r \sin^2 \alpha}{(u^2 \cos^2 \alpha + gr)}. \quad (14)$$

Что касается концентрации твердой фазы и ее влияния на коэффициент динамического сопротивления, то его можно определить по формулам (11)–(13) и принять в качестве начальных условий.

В итоге получена расчетная зависимость (14) для границы разделения твердых частиц, определяющими параметрами в которой являются скорость газового потока и угол ввода его в классификационную камеру. Первый из них можно варьировать изменением частоты вращения ротора с лопастями и, при необходимости, расходом воздуха внешнего вентилятора, а второй – поворотом жалюзи в выходном отверстии крышки ротора. Через коэффициент сопротивления можно проследить за изменением граничного размера в зависимости от концентрации твердой фазы в выходящем потоке. Причем при всех изменениях будет прослеживаться распределение частиц по размерам от выходного патрубка до обечайки классификационной камеры. Это дает возможность, установив под входным патрубком поворотный отбойник, забирать из вращающегося потока крупную фракцию определенного размера и направлять ее на повторное измельчение. Все частицы меньшего размера будут удаляться из классификационной камеры вместе с воздухом через выходной патрубок.

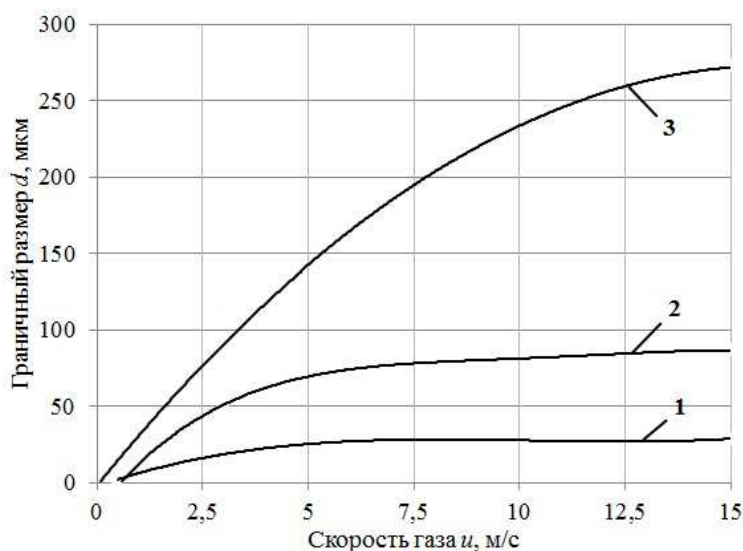
Апробация методики расчета граничного размера проводилась на дисмембраторе с диаметром ротора  $D_p = 1,0$  м и диаметром классификационной камеры  $D_k = 0,6$  м. Диаметры входного и выходного патрубков принимались  $d_n = 100$  мм. Текущий радиус при этом будет изменяться в пределах  $r = 0,1-0,3$  м. Скорость газа варьировалась в диапазоне  $u = 1-15$  м/с, угол ввода потока  $\alpha = 30-60^\circ$ . Доля твердых частиц оставалась неизменной:  $c = 0,05$ .

В начале расчета с использованием формул (11)–(13) определялся коэффициент аэродинамического сопротивления в диапазоне диаметров частиц 50–100 мкм, соответствующих тонкому измельчению, преобладающему в промышленных технологических процессах. После этого рассчитывался граничный размер по формуле (14).

Результаты расчета для радиуса  $r = 0,3$  м (внутренние стенки камеры) представлены в виде зависимости  $d = f(u)$  при разных углах закрутки потока (рисунок 3).

На первый взгляд, эти зависимости выглядят не очень логично. С увеличением скорости газа на входе в сепарационную камеру увеличивается граничный размер, что не соответствует, например, работе циклонной камеры. Но это определяется конструктивными особенностями сепарационной камеры. Ввод аэросмеси с измельченным продуктом осуществлялся непосредственно у боковой стенки камеры с максимальным радиусом. Вывод крупных недоизмельченных частиц также реализуется вблизи этих стенок, только в другом месте. Здесь будет самая высокая инерционная сила (7), прижимающая крупные частицы к стенкам обечайки. В результате такие частицы постоянно находятся в непосредственной близости от нее. Мелкие частицы силой аэродинамического воздействия отесняются к центру камеры и выводятся через патрубок для выгрузки материала. На этом основан принцип разделения измельченного продукта по размерам в данной конструкции сепаратора, который подтверждается видом графических зависимостей, представленных на рисунке 3.

На графиках видно, что с увеличением угла ввода потока граничный размер в зависимости от его скорости изменяется намного интенсивнее. Это можно четко объяснить перераспределением составляющих скорости газового потока. С увеличением угла повышается радиальная составляющая скорости  $u_r$ , а соответственно, и сила аэродинамического воздействия. В результате граничный размер в рабочем диапазоне 50–100 мкм достигается при скоростях газа, близких к 3 м/с. При меньшем угле ввода аэро-смеси ( $\alpha = 30^\circ$ ) интенсивность закрутки характеризуется высоким значением тангенциальной составляющей  $u_\tau$  и большой инерционной силой. Поэтому все твердые частицы, даже очень мелкие (10–20 мкм), прижимаются к стенке, крутятся в виде слоя по окружности и возвращаются назад в зону измельчения. Увеличение скорости газа только усугубляет этот нежелательный процесс, приводящий к резкому снижению производительности измельчающего агрегата.

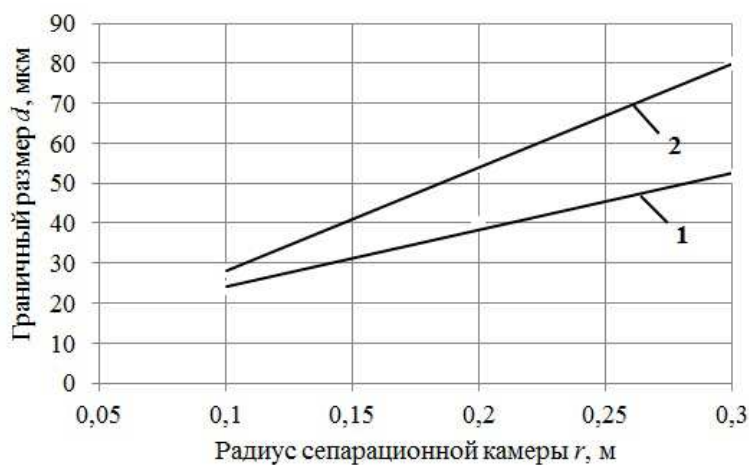


1 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 45^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 3. – Зависимость граничного размера от скорости газа при  $r = 0,3$  м

Интерес представляет и распределение частиц по размерам на разных радиусах сепарационной камеры (рисунок 4).

С увеличением радиуса сепарационной камеры граничный размер линейно увеличивается. Логично было бы сказать наоборот, с уменьшением – уменьшается. К увеличению граничного размера приводит и повышение скорости газового потока.



1 –  $u = 3$  м/с; 2 –  $u = 11$  м/с

Рисунок 4. – Распределение размеров частиц по радиусу сепарационной камеры при  $\alpha = 45^\circ$

**Заключение.** Результатом работы является методика определения граничного размера в классификационной камере новой конструкции измельчающего агрегата дезинтеграторного типа. Она основана на использовании дифференциальных уравнений движения твердых частиц в закрученном газовом потоке. Ряд обоснованных допущений позволил свести трехмерную задачу к одномерной и далее с использованием принципа Даламбера перейти от динамической задачи к статической. Состояние динамического равновесия рассматривалось под действием сил тяжести, аэродинамического воздействия и инерционной силы. Получена расчетная зависимость для определения граничного размера, причем с учетом взаимодействия частиц в сепарационной камере. Расчетным путем установлено, что граничный размер увеличивается с увеличением скорости газа и угла закрутки газового потока. Угол ввода аэросмеси должен быть выше 45°. При таком значении будет достигаться эффективное разделение частиц в диапазоне 50–100 мкм даже при низких скоростях.

Предложенная методика требует экспериментальной проверки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Хинт, И.А. УДА-технология: проблемы и перспективы / И.А. Хинт. – Таллин : Валгус, 1981. – 36 с.
3. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учебник для вузов / С.Е. Андреев, В.М. Зверевич, В.А. Перов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
4. Вайтехович, П.Е. Оптимизация технологических параметров энергоэффективной валковой мельницы / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. – 2004. – № 6. – С. 59–64.
5. Дисмембратор с классификационной камерой : пат. 9517 Респ. Беларусь / П.Е. Вайтехович, В.Ю. Мурог // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4. – С. 73–74.
6. Францкевич, В.С. Моделирование движения материала в сепараторной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81, № 6. – С. 295–300.
7. Волк, А.М. Разделение многофазных систем в полях массовых сил / А.М. Волк, В.А. Марков. – Минск : БГТУ, 2006. – 216 с.
8. Бабуха, Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г.Л. Бабуха, А.А. Шрайбер. – Киев : Наук. думка, 1972. – 176 с.

Поступила 10.12.2019

#### DISINTEGRATOR TYPE GRINDERS WITH REGULATED GRINDING TONINE

#### P. VAJTEHOVICH

*A method for calculating the boundary particle size in the built-in classification chamber of a disintegrator type grinder is proposed. It is based on the analysis of the power circuit, including gravity, inertia and aerodynamic effects. The last of them takes into account the interaction between particles. By calculation, the influence of the gas flow velocity on the boundary size and the angle of its entry into the separation chamber were established. Recommendations on the optimal geometric and speed parameters of the separation chamber are given, and ways for further work on the study of this unit are outlined.*

**Keywords:** grinder, dismembrator, classification chamber, boundary size, speed, force, calculation.

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 66.086.4

### УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ ВЛАЖНОГО КОЛЛОИДНОГО КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СБРОСОМ ДАВЛЕНИЯ

канд. физ.-мат. наук М.А. БРИЧ, Н.М. ГОРБАЧЁВ,  
канд. физ.-мат. наук И.А. КОЗНАЧЕЕВ, Д.С. МАКАРЕНКО  
(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск)  
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ, канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

*Термомеханическая обработка сбросом давления находит широкое применение в процессах сушки и пропитки древесины, подготовки растительного сырья в ходе экстракции и гидролиза. Актуальной задачей является поиск оптимальных режимных параметров такой обработки, опирающийся на построение математической модели совместных процессов внутри влажного коллоидного капиллярно-пористого тела, подверженного декомпрессии. В работе приведены результаты численного моделирования совместных процессов тепломассопереноса и упругого деформирования образца прямоугольной формы из анизотропного влажного капиллярно-пористого материала, имеющих место при термомеханической обработке. Проанализирована зависимость упругих напряжений от свойств материала и режимных параметров, определены условия разрушения образца. Полученные зависимости позволяют определить основные режимные параметры, обеспечивающие «безопасный» режим обработки материала с учетом его размеров, влагосодержания и проницаемости.*

**Ключевые слова:** термомеханическая обработка, сброс давления, паровзрывной автогидролиз.

**Введение.** Термомеханическая обработка влажного пористого материала сбросом давления заключается в его нагреве под давлением выше линии насыщения с последующей быстрой декомпрессией. Если время сброса давления значительно меньше времени релаксации давления в материале, возникающий нерелаксируемый градиент давления парожидкостной среды создает в материале механические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Фильтрационный двухфазный поток при декомпрессии выносит из материала воду и водяной пар, в результате содержание влаги в материале снижается и меняется распределение влаги в нем. Этот эффект используется при термомеханическом обезвоживании, обеспечивая быструю и качественную сушку даже крупномерной древесины [1]. Вместе с тем, если напряжения, возникающие при декомпрессии, достаточно велики, обработка сбросом давления позволяет обеспечить эффективную деструкцию материала, увеличить его проницаемость и удельную поверхность. Такой эффект декомпрессии используется на стадии подготовки растительного сырья в целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, в процессах экстракции [2]. Происходящее при декомпрессии разволокнение материалов увеличивает их проницаемость и доступность для реагентов при последующей обработке, позволяя значительно снизить потребление химических реагентов в процессах гидролиза, повысить отдачу при экстракции. Происходящее при такой обработке разрушение древесины на микроуровне значительно повышает эффективность пропитки.

Поиск оптимальных режимов обработки в зависимости от требований к конечному продукту и способов реализации этой технологии является актуальной задачей. Длительный прогрев материала при существующих способах реализации (когда используется конвективный нагрев) снижает его производительность. Эффективным решением является микроволновой нагрев.

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова реализована технология сушки со сбросом давления с СВЧ-нагревом материала под давлением. При интенсивном микроволновом нагреве влажного пористого тела в нем также возникает нерелаксируемый градиент давления парожидкостной среды, приводящий к возникновению в нем фильтрационного потока [3]. Этот способ термомеханической обработки следует считать перспективным, т.к. он обеспечивает разрушение растительного материала на клеточном уровне и интенсифицирует механохимические процессы в нем.

Для управления процессом термомеханической обработки сбросом давления или интенсивного микроволнового нагрева коллоидного капиллярно-пористого материала необходима информация о зави-

симости распределения напряжений в этом материале от режима обработки, характеризующегося давлением и температурой запирающего газа, способом и интенсивностью нагрева, временем декомпрессии, и от свойств материала – его влажности, теплопроводности, проницаемости, диэлектрических свойств, модуля упругости, размеров. Если время декомпрессии или нагрева меньше времени релаксации давления в этом материале, то контроль в нем распределения влажности и градиента давлений, а значит, и напряжений, практически невозможен. Определение режимов обработки возможно в этом случае только на основе адекватных математических моделей тепло- и массообмена и упругонапряженного состояния.

В настоящее время в связи с использованием паровзрывного автогидролиза в промышленности активно ведутся исследования по установлению зависимости изменения удельной поверхности древесины от перепада давления и времени декомпрессии, например, работы А.Б. Просвирникова [4], а также работы по исследованию микроволнового излучения на деструкцию растительных материалов, проводимые в США [5]. Однако все эти работы относятся к исследованию обработки капиллярно-пористых тел, а большинство материалов, подвергаемых этой обработке, являются коллоидными капиллярно-пористыми материалами, снижение влажности в которых сопровождается сокращением их размеров (усушкой), приводящим к возникновению в них внутренних напряжений. Влияние усушки на напряженное состояние при постоянном давлении рассматривалось в работе [6], где показано, что при интенсивном обезвоживании формируется неравномерное распределение влагосодержания по объему материала.

В настоящей работе решается задача по определению напряжений в капиллярно-пористом материале при его сушке со сбросом давления с учетом совместного действия факторов градиента давления и усушки.

**Расчетная модель.** Расчеты проведены для образца прямоугольной формы из влажного капиллярно-пористого материала – древесины (сосна), с характерными размерами  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  (рисунок 1). Предполагается, что волокна расположены вдоль оси  $z$  и выполняется условие  $L_x \ll L_y \ll L_z$ . В этом случае потоки в направлении  $y$  и  $z$  незначительны в сравнении с потоками в направлении  $x$ , что позволяет рассматривать зависимость параметров состояния только от времени и координаты  $x$  (за исключением деформации в направлении  $y$ , которая может оказывать значительное влияние на компоненту тензора напряжений  $\sigma_{yy}$ , что важно при оценке условий разрушения). Условие  $L_z \gg L_y$  гарантирует низкие значения потоков в направлении  $z$ , несмотря на тот факт, что проницаемость древесины вдоль волокон выше, чем в поперечном направлении. Также предполагалось, что упругие свойства материала в плоскости, перпендикулярной к направлению волокон, изотропны.

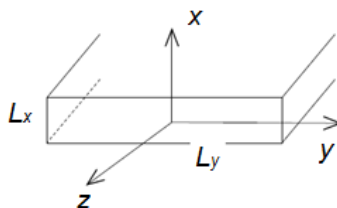


Рисунок 1. – Расчетные геометрические параметры образца и система координат

Процессы тепло-массообмена и деформирования протекают совместно и являются взаимосвязанными, однако, если пренебречь изменениями фильтрационных свойств порового пространства, вызванными механическими деформациями, то задача тепло-массообмена может рассматриваться независимо, что существенно упрощает решение.

Математическая модель тепло- и массообмена включает уравнения баланса массы и энергии, уравнения движения в форме уравнения фильтрации двухфазной среды, выраженные в форме обобщенного закона Дарси с коэффициентами относительной фазовой проницаемости для жидкой и газообразной фаз:

$$v_i = -K \frac{k_i(s)}{\eta_i} \nabla p, \quad (1)$$

где  $v_i$  – скорость фильтрации  $i$ -го компонента;  
 $\eta_i$  – динамическая вязкость  $i$ -го компонента;  
 $p$  – давление;  
 $K$  – коэффициент проницаемости капиллярно-пористого материала;

$k_i(s)$  – относительная фазовая проницаемость для жидкой и газообразной фаз, зависящая от влагосодержания  $s$ , которая рассчитывается по формулам [7]:

$$k_g(s) = \begin{cases} 0, & 0 \leq s \leq 0,1, \\ \left(\frac{s-0,1}{0,9}\right)^{3,5} (4-3s), & 0,1 \leq s \leq 1; \end{cases} \quad k_l(s) = \begin{cases} \left(\frac{0,85-s}{0,8}\right)^{3,5}, & 0 \leq s \leq 0,8, \\ 0, & 0,8 \leq s \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$

где насыщенность  $s$  связана со значением влагосодержания  $w$  следующим образом:

$$s = 1 - w \frac{\rho_M^0 (1-\gamma)}{\rho^0 \gamma}, \quad (3)$$

где  $\rho^0$  – плотность воды;

$\rho_M^0$  – плотность сухого материала;

$\gamma$  – пористость.

Граничные условия для поверхности образца включают в себя условие постоянной температуры, которая соответствует температуре насыщения при заданном внешнем давлении, и условие свободного удаления парогазовой смеси с поверхности материала в окружающую среду с заданным давлением  $P_{OC}(t)$ . В начальный момент времени  $P_{OC} = P_0$ , затем линейно снижается до атмосферного давления за время  $\tau_p$ .

При моделировании использовался метод численного решения Патанкара [8].

Деформация образца рассчитывалась на основании обычных соотношений теории упругости [9] – соотношений между компонентами тензора напряжений  $\sigma_{ik}$  и тензора деформаций  $u_{ik}$ , которые в случае деформации только в двух направлениях (мы пренебрегаем деформацией вдоль волокон (ось  $z$ )) принимают форму

$$\sigma_{ik} = \kappa u_{nn} \delta_{ik} + 2\mu \left( u_{ik} - \frac{1}{2} u_{nn} \delta_{ik} \right) + \kappa \beta (w^* - w) \delta_{ik}, \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{E}{2(1-2\nu)}, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (6)$$

$$u_{ik} = \frac{1}{2} (\partial_i U_k + \partial_k U_i), \quad (7)$$

$$\partial_k \sigma_{ik} + F_i = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = -\nabla P, \quad (9)$$

$$\partial_k \equiv \partial / \partial x_k^0,$$

где  $\kappa$  – объемный модуль упругости;

$\beta$  – коэффициент усушки;

$w^*$  – критическое влагосодержание;

$E$  – модуль Юнга в направлении поперек волокон;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\mu$  – модуль сдвига;

$\mathbf{U} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  – вектор смещения точек образца вследствие деформации;

$\mathbf{F}$  – плотность объемных сил;

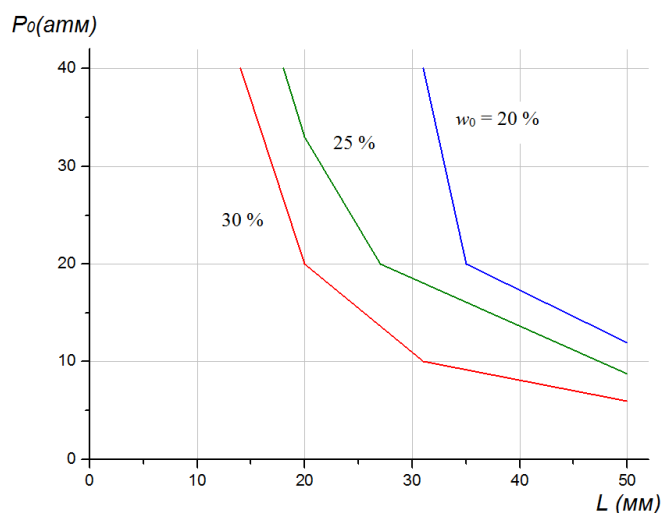
$\delta_{ik}$  – символы Кронекера.

Условием разрушения материала является превышение какой-либо из компонент тензора напряжений значения предельного напряжения  $\sigma^*$ . Зависимости величины предельного напряжения  $\sigma^*$  и модуля Юнга  $E$  от температуры и влагосодержания аппроксимировались линейными сплайнами, построенными на основании данных [11]. Зависимость коэффициента усушки от влагосодержания определена равенствами [10]

$$\beta = 0,18 (w < w^*), \beta = 0 (w > w^*), w^* = 0,25.$$

Для коэффициента Пуассона было принято значение  $\nu = 0,4$  [12].

**Результаты расчета и заключение.** Была проведена серия расчетов для различных значений размера образца  $L_x$ , начального влагосодержания  $w_0$  и начального давления  $P_0$ , в результате которых определена область значений указанных параметров, при которых происходит разрушение образца. Линии, представленные на рисунке 2, соответствуют пограничным значениям  $P_0$  и  $L_x$  при разных значениях  $w_0$ . Области параметров, расположенные правее и выше соответствующей кривой, отвечают условиям разрушения.



**Рисунок 2.** – Диаграмма критических значений параметров ( $\tau_p = 0,5$  с;  $K = 0,2 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>)

Расчеты также показали, что при малых временах сброса основную роль в процессах разрушения играет градиент давления, а усушка вносит сопоставимый вклад при  $\tau_p \geq 10$  с.

Для образцов из материалов растительного происхождения, подвергаемых интенсивному обезвоживанию (термомеханическое обезвоживание со сбросом давления, интенсивный микроволновой нагрев) в случае, когда влагосодержание материала или отдельных областей в нем находится вблизи предела гигроскопичности или меньше ее, при выборе режима обработки необходимо учитывать напряжение от усушки, если характерные размеры образцов превышают 20 мм.

При времени сброса давления значительно меньше времени релаксации давлений в обрабатываемом материале напряжение, вызванное градиентом давления, значительно превышает напряжение от усушки.

Полученные зависимости позволяют определить основные режимные параметры, обеспечивающие «безопасный» режим обработки материала с учетом его размеров, влагосодержания и проницаемости. Эксперименты по обезвоживанию крупномерной древесины (до 200 мм), проведенные в Институте тепло- и массообмена, согласуются с полученными результатами [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев, Н.М. Высокотемпературная сушка крупномерной древесины методом сброса давления / Н.М. Горбачев, В.П. Кожин // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) (СЭТТ-2011) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 20–23 сентября 2011 г. – М. : МГАУ, 2011.
2. Лыков, А.В. Исследование процессов сушки в поле высокой частоты / А.В. Лыков, Г.Д. Максимов // Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1957. – С. 133–142.
3. US Patent 6596975. Method for increasing of permeability of wood / Vinden P. Romero, F. Torgovnikov ; 2003.
4. Просвирников, Д.Б. Совершенствование техники и технологии процесса высокотемпературной паровзрывной обработки древесных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.Б. Просвирников. – Казань, 2013. – 19 с.
5. Li, Xingian. A single cellmodel for pretreatment of wood by microwave explosion / Xingian Li // Holz forschung. – 2010. – Vol. 64. – P. 633–637.
6. Ишлинский, А.Ю. Прикладные задачи механики / А.Ю. Ишлинский : – М. : Наука, 1986. – 875 с.
7. Muskat, M. The flow of homogeneous fluids through porous media / M. Muskat. I.W. Edwards, Inc., AnnArbor, Michigan, 1946.
8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : [пер. с англ.] / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.



9. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1987. – 246 с.
10. Simpson, W.T. Drying and control of moisture content and dimensional changes / W.T. Simpson // In: Wood handbook – Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Madison, 2010.
11. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины : учебник для вузов / П.С. Серговский, А.И. Расев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Лесн. пром-ть, 1987. – 360 с.
12. Green, D.W. Mechanical Properties of Wood / D.W. Green, J.E. Winandy, D.E. Kretschmann // In: Wood handbook – Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Madison, 1999.

Поступила 17.12.2019

#### DESTRUCTION CONDITIONS OF THE WET COLLOIDAL CAPILLARY-POROUS MATERIAL DURING THERMOMECHANICAL TREATMENT BY PRESSURE DROP

**M. BRITCH, N. GORBACHOV, I. KOZNACHEEV,  
D. MAKARENKO, Y. GROZBERG, A. ADAMOVICH,**

*Thermomechanical treatment by pressure drop is widely used in the drying and impregnation of wood, pretreatment of plant materials during extraction and hydrolysis. An urgent task is to find the optimal regime parameters of such processing, based on the construction of a mathematical model of combined processes inside a wet colloidal capillary-porous material subjected to decompression. The paper presents the results of numerical modeling of joint heat and mass transfer and elastic deformation of a rectangular sample of anisotropic wet capillary-porous material that occur during thermomechanical processing. The dependence of elastic stresses on the properties of the material and operating parameters is analyzed, and conditions for the destruction of the sample are determined. The obtained dependences make it possible to determine the main operating parameters providing a “safe” mode of processing the material, taking into account its size, moisture content and permeability.*

**Keywords:** thermomechanical treatment, pressure relief, vapor explosion autohydrolysis.

УДК 004.78:004.056

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ВИДЕ ОБЛАЧНОГО СЕРВИСА

*д-р. техн. наук, проф. А.А. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доц. Т.В. СМИРНОВА,  
канд. техн. наук, доц. А.Н. ДРЕЕВ  
(Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий),  
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается построение математической модели оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса на основе комбинации нескольких технологических процессов. Решены следующие задачи: проанализирован абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу; сформулирована информационная модель технологического процесса и методы ее получения; рассмотрены абстрактные экспертные системы, их составляющие; проведен обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду; формализованы подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов; формализованы рекомендательные системы для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройки экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.*

**Ключевые слова:** *облачный сервис, информационные технологии, экспертные системы, восстановление, упрочнение, деталь, технологический процесс.*

**Введение.** Современные линии восстановления поверхностей деталей работают в условиях гибкого изменения параметров проведения технологических операций. т.е. когда одни технологические процессы восстановления и упрочнения поверхностей могут заменяться другими технологиями восстановления и упрочнения в зависимости от видов повреждения материалов и от требований к условиям эксплуатации конечного продукта. Несмотря на активную разработку информационных систем поддержки принятия решений для обеспечения оптимизации отдельных технологических процессов [2], не хватает систем для решения задачи построения оптимизированной цепи технологических процессов с выбором более оптимального процесса среди альтернативных [5]. Кроме того, с развитием компьютерных технологий возрастает актуальность использования облачных технологий в реализации информационных систем. В связи с этим в информационном обеспечении экспертных систем оптимизации цепи технологических процессов было решено реализовать облачную рекомендательную систему как сервис (SaaS) для получения поверхностей валов из стали 45 с заданными характеристиками на основе комбинации нескольких технологических процессов. Достижение поставленной цели требует решения ряда задач, однако для их формулирования и определенности в применяемых облачных информационных технологиях необходимо определить виды и область применения экспертных и рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов.

### **Основная часть**

*Абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу.* Поиск оптимальных решений при проектировании технологического процесса с несколькими операциями восстановления поверхностей изношенных валов имеет ряд особенностей. Технологический процесс должен состоять из цепи отдельных технологических операций, каждая из которых из-за разных причин может быть заменена на технологическую операцию на другой основе, но аналогичную по полученному результату. Другими словами, каждый этап обработки – подготовка поверхности, восстановление, механическая обработка, упрочнение поверхности – создает цепь технологических операций, где каждая операция может быть выполнена несколькими методами. Для любого этапа обработки характерна технологическая наследственность, когда использование обработки ограничивается за счет условий, наложенных предыдущей использованной операцией. Проблемой является частичная технологическая наследственность, когда следующие операции частично перекрывают несколько предыдущих, что значительно усложняет полный граф возможных цепей проведенных операций. В связи с этим оптимизация процесса восстановления и упрочнения деталей невозможна к определению полной цепи обработки [5].

Для оптимизации технологии по цепи технологического процесса используют экспертные системы, общая структура которых показана на рисунке 1.

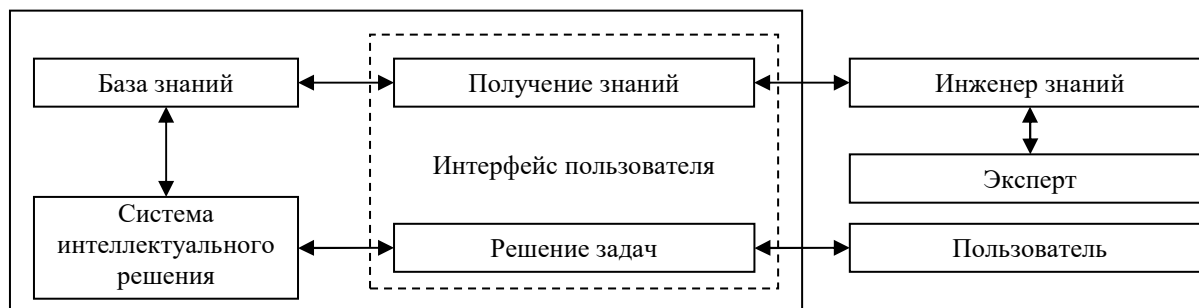


Рисунок 1. – Абстрактная экспертная система [1]

В схеме использованы следующие обозначения:

- эксперт – специалист по данной технологической операции;
- инженер знаний – специалист, который формализует знание экспертов, отвечает за процесс получения знаний и предоставление их к базе знаний экспертной системы;
- база знаний – множество доступных знаний относительно избранной технологической операции;
- система интеллектуального решения – ключевой элемент экспертной системы, который на основе имеющихся знаний и входных параметров поставленной задачи предоставляет параметры технологического процесса с оптимизацией заданными критериями (время работы, доступные материалы, совокупные денежные затраты);
- интерфейс пользователя отвечает за взаимодействие между компьютерными системами и человеком.

Рассмотрим экспертные системы на основе объектного подхода к классификации методов представления знаний (рисунок 2).



Рисунок 2. – Методы представления знаний в экспертных системах

К приведенному абстрактному представлению экспертной системы принадлежат следующие разновидности экспертных систем: семантические, фреймовые, продукционные, нейросетевые.

*Семантические экспертные системы* оперируют сущностями и их атрибутами. Атрибут может иметь количественные характеристики, которые относятся к классу свойств сущностей. Технологические операции имеют сущности в виде технической детали, когда в процессе восстановления атрибуты этой детали необходимо перенести из входного диапазона значений к заданным параметрам. Важное значение в технологической операции имеют технологические инструменты, когда для проведения обработки выбираются именно те, которые имеют соответствующие атрибуты с определенными значениями этих атрибутов. В процессе решения система должна учитывать изнашиваемость инструментальной базы и соответственно учитывать стоимость инструментов по отношению к окончательной стоимости проведенных операций. Формально семантический элемент  $C_i$  можно представить следующим образом:

$$C_i = \langle N_i, S_i, p_i \rangle, S_i \subset S,$$

где  $N_i$  – название сущности;  
 $S$  – множество доступных атрибутов;  
 $S_i$  – множество атрибутов, которые относятся к конкретной сущности. Один атрибут может принадлежать нескольким сущностям;  
 $p_i$  – количественная характеристика атрибута (если она есть).

К недостаткам указанной экспертной системы можно отнести усложненную структуру базы знаний, когда система атрибутов не является фиксированной и может существенным образом изменяться от сущности к сущности. Совокупность сущностей и атрибутов может образовывать сложные графы зависимостей, которые неудобно описывать в стандартных таблицах релятивных баз данных.

*Фреймовые экспертные системы* являются продуктом развития семантической экспертной системы и больше напоминают объектный метод описания базы знаний. Фреймы формируют иерархию объектов, которые они представляют. Фрейм состоит из каркаса групп данных – слотов. В качестве слотов могут выступать факты, фреймы ниже по иерархии, условия применения действий и действия, которые могут выполняться над данными. Формально фрейм может быть представлен следующим образом:

$$F_i = \langle N_i, S_{1i}, S_{2i}, S_{3i} \rangle,$$

где  $N$  – название фрейма;  
 $S_1$  – множество фактов, которые определяют декларативную семантику фрейма;  
 $S_2$  – множество связей, которые указывают на другие фреймы;  
 $S_3$  – множество преобразований, которые определяют функциональную семантику фрейма.

Фреймы имеют общие черты с объектно-ориентированным методом представления знаний. Общими чертами является наследственность фреймов, наличие фрейма-образца – аналога виртуальных классов или интерфейсов, фрейм-экземпляр – аналог объекта, который является экземпляром класса. Благодаря декларативности и одновременно функциональности фреймовых и объектно-ориентированных методов предоставления знаний, эта модель имеет значительную универсальность. Также к функциональным возможностям фреймов можно отнести математические регрессионные модели и также модели, основанные на нейронных сетях и нечеткой логике. Поэтому, по причине максимального соответствия семантике из предметной области, для описания технических процессов можно предпочесть преимущество фреймам.

*Информационная модель технологического процесса и методы ее получения.* В процессе построения экспертных систем оптимизации технологического процесса необходимо пройти следующие этапы:

1. Определение входных/выходных данных.
2. Составление словаря атрибутов, которые присущи избранной технологической операции.
3. Выявление объектов и понятий.
4. Выявление связей между входными управляемыми и неуправляемыми параметрами технологической операции.
5. Определение целей оптимизации.
6. Определение стратегий определения параметров технологической операции для достижения поставленных оптимизационных задач.

Проиллюстрируем информационную модель технологического процесса на основе восстановления поверхности покрытиями после электродугового напыления. Модель разрешает получить информацию для расчета характеристик после обработки. При построении математической модели технологического процесса по обыкновению ограничиваются представлением объекта исследования в виде «черного ящика». В результате возникает потребность в функциональном увязывании входных данных и определенных неуправляемых величин с параметрами, требуемыми от технологического процесса. Для электродугового напыления, как и для большинства технологических процессов, такая функциональная зависимость будет иметь следующий вид:

$$\vec{Y} = f\left(\vec{X}, \vec{V}, \vec{Z}, \vec{R}\right), \quad (1)$$

где  $\vec{X}$  – контролируемые величины процесса. Для этих величин существуют ограничения  $x_{\min,i} \leq x_i \leq x_{\max,i}$ ;

$\vec{V}$  – известные, но неконтролируемые величины процесса;

$\vec{Z}$  – неизвестные и неконтролируемые величины;

$\vec{R}$  – случайные величины, которые влияют на процесс;

$\vec{Y}$  – параметры, которые достигаются в процессе технологической обработки. Случайная составляющая является неконтролируемой, поэтому в моделях часто ими пренебрегают, но в процессе оценивания адекватности модели обязательно делается поиск надежных интервалов ожидаемых величин с реальными результатами.

Параметры электродугового напыления, определяющие режимы технологического процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры электродугового напыления

Название параметра	Обозначение	Допустимые границы
Напряжение дуги	$x_1$	$U = 28..34$ В
Дистанция напыления	$x_2$	$L = 80..200$ мм
Диаметр проволоки	$x_3$	$d = 1,2..2,2$ мм
Толщина покрытия	$x_4$	$h = 0,5..3,0$ мм
Давление	$x_5$	$P = 2..10$ МПа
Скорость скольжения	$x_6$	$V = 2,0..2,75$ м/с

В результате многофакторного эксперимента с регрессией результатов на степенной полином имеем математическую модель технологического процесса электродугового напыления (ЭДН), например, для прочности сцепления:

$$y_2 = 94,5537 - 16,1578 \cdot x_1 + 8,66664 \cdot x_2 - 4,37462 \cdot x_3 - 17,2747 \cdot x_4 - 3,92423 \cdot x_5 - 16,0642 \cdot x_6 - 17,0532 \cdot x_2 \cdot x_6 - 22,4759 \cdot x_3 \cdot x_6 - 9,99573 \cdot x_4 \cdot x_6 + 1,41499 \cdot x_5 \cdot x_6. \quad (2)$$

Выходные параметры технологического процесса электродугового напыления (параметры, характеризующие качество восстановленных поверхностей) представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Параметры, которые необходимо получить в результате обработки электродуговым напылением  $\vec{Y}$

Название параметра	Обозначение	Полученные границы
Пористость	$y_1$	$< 10\%$
Прочность сцепления	$y_2$	$\sigma = 30..70$ МПа
Микротвердость	$y_3$	$6900..7300$ МПа
Износостойкость	$y_4$	$J_h = 11..15$ мкм/км (10–12)

Для других исходных параметров также имеем математические регрессионные отношения или правила их нахождения. Множество отношений (1) и по типу (2) составляют математическую модель технологического процесса.

В дальнейшем построение экспертной системы требует наличия соотношений для нахождения параметров, которые оптимизируются, например, денежные затраты, время обработки и израсходованный исходный ресурс соответственно:

$$G(\vec{Y}), T(\vec{Y}), E(\vec{Y}), \dots \quad (3)$$

Для технологического процесса (3) на основе математической модели технологического процесса (2) и расчета затрат на его выполнение авторами построена экспертная система оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхности валов электродуговым напылением.

Схема предусматривает наличие итерационного поиска методом постепенного улучшения результата из начального допустимого режима работы системы. Для более надежного результата, при наличии значительной нелинейности, такой процесс можно проводить с нескольких начальных точек.

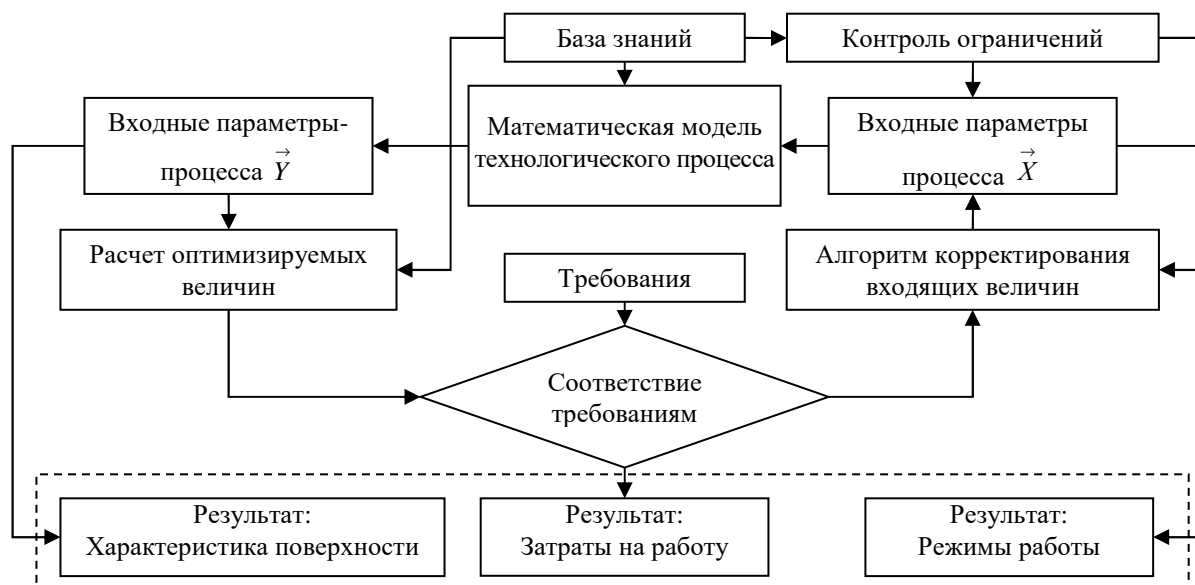


Рисунок 3. – Диаграмма потока информации для реализации экспертной системы оптимизации процесса восстановления поверхностей валов электродуговым напылением

В результате анализа информационных потоков во время оптимизации технологического процесса восстановления поверхностей электродуговым напылением получены следующие информационные единицы:

1. База знаний, которая содержит: данные экспериментов, допустимые диапазоны входных данных, список входных параметров, список выходных параметров, методы и математическое обеспечение расчетов затрат на процесс.
2. Система получения требований к результатам восстановления и критерий (или критерии) оптимизации.
3. Система поиска экстремумов в многомерном пространстве.
4. Система проверки на достижение результата.
5. Система выявления «зацикленности» поиска решений в случаях недостижимости поставленных требований.
6. Система введения неконтролируемых входных параметров (в указанной системе не использовано, т.к. оборудование имеет контролируемую среду обработки [3]).
7. Система обеспечения информационного потока между компонентами экспертной системы с учетом синхронизации и взаимных блокировок.

Перечисленные пункты являются составляющими информационного обеспечения функционирования экспертной системы.

*Абстрактные экспертные системы, их составляющие.* На основе показанной информационной модели технологической операции электродугового напыления проведены формализация и обобщение информационной модели на большинство технологических операций восстановления и упрочнения стальных поверхностей.

Математическая модель технологического процесса восстановления поверхностей на основе (1) имеет следующий вид:

$$\vec{Y}_k = f\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k\right), \quad (4)$$

где  $\vec{Y}_k \in Y$  – количественные значения подмножества характеристик поверхностей, которая получена по результатам технологического процесса  $k$ ;

$\vec{X}_k \in X$  – количественные значения подмножества известных и контролируемых параметров отдельного технологического процесса из всех доступных. Согласно предыдущим подмножествам, обозначены подмножества, которые относятся к неконтролируемым и другим входным параметрам (1).

В общем случае неизвестно количество данных для построения математической модели технологического процесса, поэтому невозможно заранее определить методы ее построения. Для этого необхо-

димо дополнить модель добавочными данными и средствами построений математических моделей  $M$ . Множество применимых методов построения математических моделей процесса будет обозначаться  $\vec{M}_k \in M$  и будет зависимо от имеющегося набора данных для построения моделей:

$$\vec{M}_k = C \left[ M, \underline{\text{def}} Y_k, \underline{\text{def}} X_k, \underline{\text{def}} V_k \right], \quad (5)$$

где  $\text{def}$  определяет операцию отбора известных значений, которые будут использованы для построения математической модели.

Такое определение выбора множества методов построения математической модели объясняется тем, что при большом количестве данных можно для регрессии использовать методы на основе аппроксимаций или нейронные сети. При малом наборе данных выбор суживается к выбору между методом наименьших квадратов, сплайнов или интерполяционных операций, поэтому операция фильтрации допустимых методов (5) необходима. При дополнении базы знаний методы математического моделирования могут изменяться. Выбор метода из допустимых  $F$  может быть возложен на человека или выполняться автоматически по заранее внесенным приоритетам. Фактически экспертная система будет включать в себя вложенную экспертную систему математического моделирования и алгоритмов поиска максимумов и минимумов на ней. Результатом действия такой системы является готовая математическая модель

$$f : \left[ \vec{M}_k, y, x, v \right], \quad (6)$$

где  $f$  – функция, которая использована в (4).

Редко технологические процессы являются составными сложных, многоэтапных, технологий восстановления или упрочнения поверхностей деталей. В таком случае поверхность во время обработки не принимает на выходе значения  $Y_k$ , а происходит преобразование свойств поверхности. При этом на результат могут влиять входные свойства (как при шлифовании) или не влиять (как при электродуговом напылении). Поэтому для обобщенной модели технологического процесса модель (4) необходимо дополнить входными параметрами поверхности:

$$\vec{Y}_k = F \left[ C \left[ M, y, x, v \right] \right] \left( \vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k, \vec{Y}_{k-1} \right). \quad (7)$$

Указанные замечания и дополнения требуют внесения изменений в диаграмму движения информации (см. рисунок 3) в экспертной системе следующим образом (рисунок 4).

*Обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду.* В диссертации В.В. Лимаренко [3] представлена разработка информационной системы поддержки решений, в состав которой входит экспертная система по оптимизации технологических процессов механической обработки резанием (рисунок 5).

Согласно рисунку модель содержит рассмотренные в предыдущем пункте функции модели процесса механической обработки резанием, расчеты параметров которого можно включить в оптимизацию, выделенные входные и выходные данные. При этом к входным данным относятся требования к результату обработки изделия после напыления, ограничение на ресурсы, а к выходным – параметры технологического процесса и параметры полученного изделия с покрытием с затратами на электродуговое напыление.

Можно также отметить, что если уникальные параметры включить к множествам  $M$ ,  $V$ ,  $X$ , и  $Y$ , то запись в векторной форме (7) будет также являться обобщением и к техническим процессам механической обработки.

На рисунке 4 представлено движение информации в экспертной системе оптимизации технологического процесса, построенного на базе анализа процесса электродугового напыления. Прослеживается цикличность движения информации с проверкой достижения заданных условий. Наличие такого цикла в ряде методов поиска оптимума присутствует и в процессах механической обработки восстановленных поверхностей (рисунок 6).

Это свидетельствует о том, что обобщение технологического процесса, по крайней мере, разрешит получить информационную систему операций процесса электродугового напыления для восстановления (упрочнения) поверхностей деталей, так и для операций, которые используют при механической обработке покрытий после ЭДН.

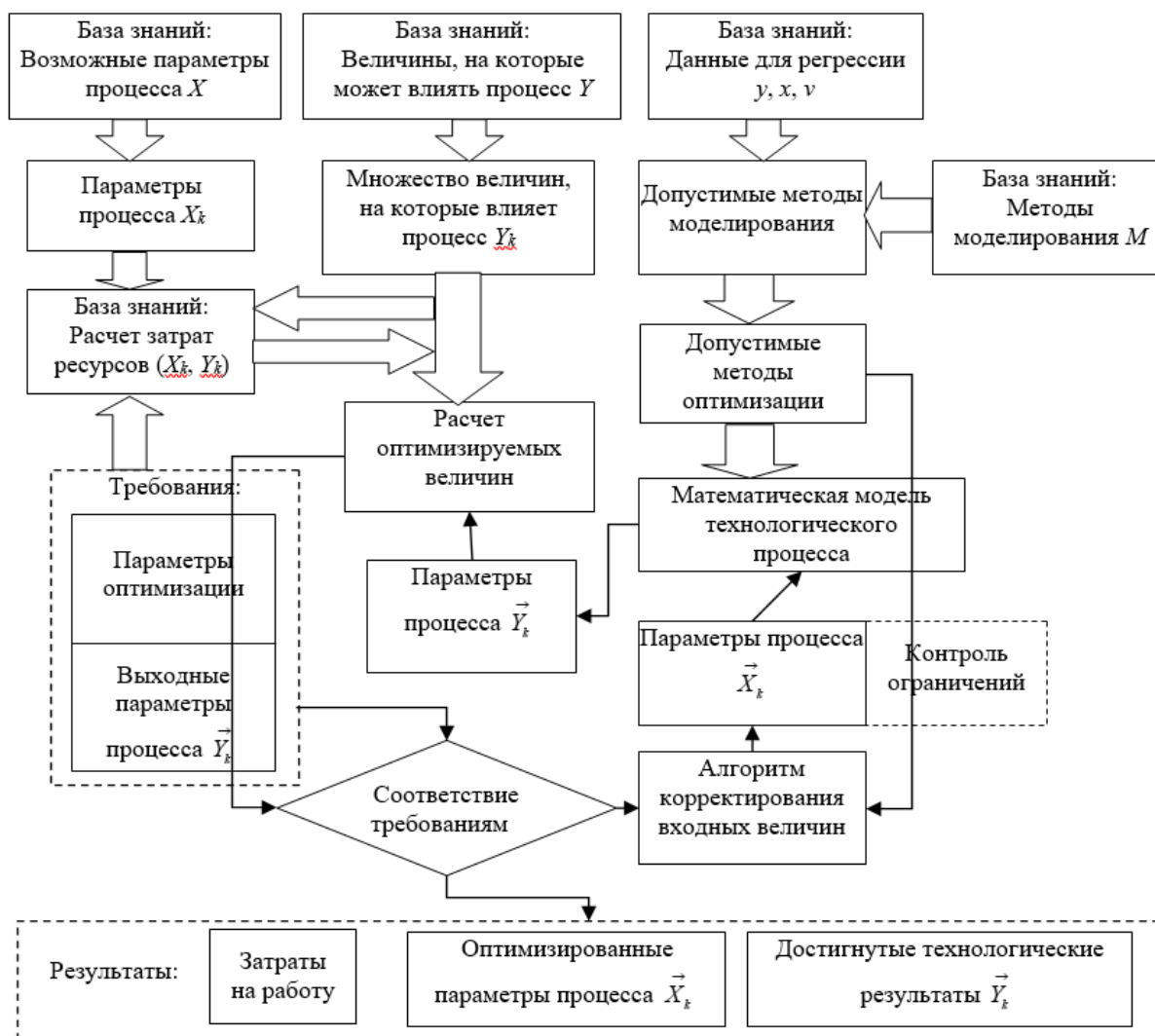


Рисунок 4. – Диаграмма потока информации в реализации обобщенной  $k$ -й экспертной системы оптимизации технологического процесса электродугового напыления

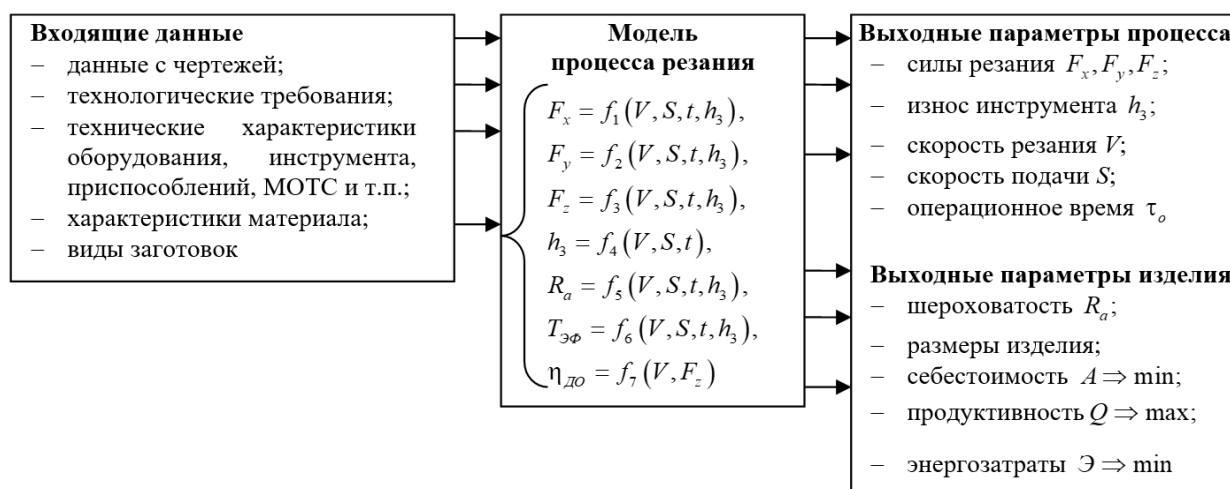


Рисунок 5. – Модель процесса механической обработки электродуговых покрытий [3]



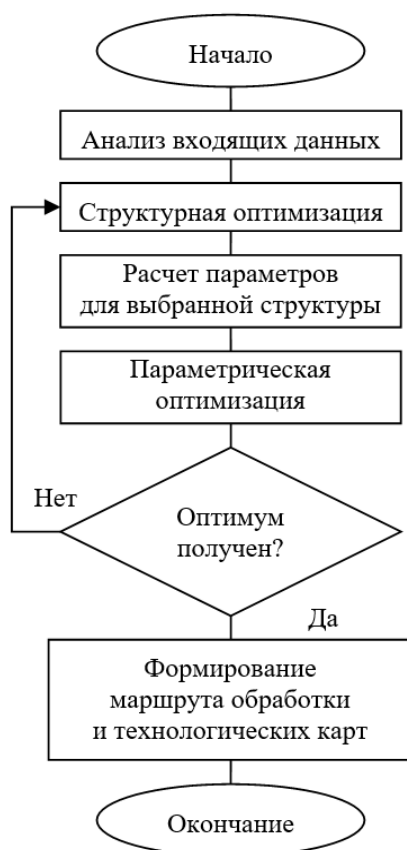


Рисунок 6. – Схема оптимизации технологического процесса восстановления (упрочнения) методом электродугового напыления [3]

Формализация подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов. На основе математического соотношения (7) и диаграммы потока информации в обобщенной экспертной системе технологического процесса (см. рисунок 4) авторами проведена формализация. Для этого использованы следующие обозначения множеств, которые формируют базу знаний для ряда технологических процессов  $S = \langle X, Y, V, M, P, D, G \rangle$ , включающую операцию выделения подмножеств элементов, касающихся отдельной технологической операции  $k$ :

1.  $X_k$  – множество управляемых параметров технологического процесса  $k$ .
2.  $Y_k$  – множество параметров детали, которые контролирует или изменяет технологический процесс  $k$ .
3.  $V_k$  – множество параметров, которые не управляются, но которые необходимо учитывать при выполнении технологического процесса  $k$ .
4.  $M_k$  – множество методов получения математической модели технологического процесса  $k$ .
5.  $P(m)$ ,  $m \in P(M_k)$  – избранный экземпляр из методов оптимизации, который применим для указанных математических моделей,  $P$  – операция выбора метода из множества методов. Операция выбора может проводиться автоматически или по выбору разработчика экспертной системы.
6.  $D_k$  – множество функций расчета материальных, в т.ч. и временных, затрат на осуществление технологического процесса  $k$ , по которым может проводиться процесс оптимизации. Сюда же входят линейные или более сложные комбинации для получения окончательной многофакторной весовой оптимизационной функции.
7.  $G_k$  – множество материальных ресурсов, используемых в технологическом процессе.

Знаком вектора, как это сделано в предыдущем пункте, на соответствующих обозначениях определяем конкретный кортеж реальных величин, которые отвечают множеству избранных величин и характеристик. Тогда (см. рисунок 4) получим следующие соотношения для отдельного технологического процесса  $k$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{X}_k = m\left(\vec{Y}_k, \vec{V}_k, \vec{Y}_{k-1}, \vec{G}_k\right), \\ \vec{G}_k = D_k\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k\right), \\ \left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \min, \\ \left| \vec{G}_k \right| = \infty, \text{ если } \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k. \end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь более значимо значение нормирования, которое принимает содержание выделения скаляра из вектора материальных затрат. Метод выделения скаляра может сильно отличаться в зависимости от избранного технологического процесса, но в большинстве случаев за эту операцию можно принять линейную комбинацию материальных и временных затрат. В случае потребности достижения максимальности одного из показателей предлагается в линейной комбинации использовать отрицательные коэффициенты.

Сложность в поиске оптимального режима обработки ЭДН заключается в том, что система (8) содержит в качестве аргументов и результатов одни и те же множества числовых значений. При этом операции  $m$  и  $D_k$  могут иметь нелинейный характер, участки опоздания или не будут выражаться аналитически, когда процессы расчета могут выполняться декларативно, или быть результатом имитационного моделирования.

Также для применимости некоторых алгоритмов оптимизации проведено дополнение  $\left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \infty, \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k$ , которое вступает в силу в случае невозможного требования к технологическому процессу и возвращает значительно превышенную потребность в ресурсах. Тем самым любой процесс становится пригодным для использования, но его использование принимается за крайне неэффективное.

Такое введение разрешает добавить к алгоритмам оптимизации дополнительно большую базу поисковых эвристик. Аналитическое дополнение расчетов использованных ресурсов быстрым ростом ресурсных нужд при выходе за входные требования технологического процесса расширяет методики оптимизации градиентными спусками.

Совокупность технологических процессов  $S$  и (8) формируют формальную задачу множества технологических процессов. Добавление к базе знаний нового технологического процесса сопровождается следующими операциями:

$$\{S = S \cup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle\}, \quad (9)$$

где  $k$  – номер добавленного к системе технологического процесса.

Графическое изображение (8) и (9) представлено на рисунке 7.

*Формализация рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройки экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.* Изготовление продукции требует использования последовательности технологических процессов. Например, восстановление и упрочнение поверхностей валов включает напыление металла с целью повышения их износостойкости, а затем проводится обработка поверхностей до заданных геометрических параметров с учетом допусков и требований к их качеству. Деталь с параметрами  $\vec{Y}_k$  после каждого из технологических процессов обработки имеет вид  $\vec{Y}_{k-1}$  согласно введенным обозначениям. Это формирует цепь технологических операций

$$Y = \sum_{(k)} \vec{Y}_k, \quad (10)$$

где  $k$  является экземпляром комбинаторной конфигурации из доступных технологических процессов, а  $(k-1)$  обозначает предыдущий технологический процесс.

На основе (10) можно проиллюстрировать цикл обработки как граф доступных процессов (рисунок 8).

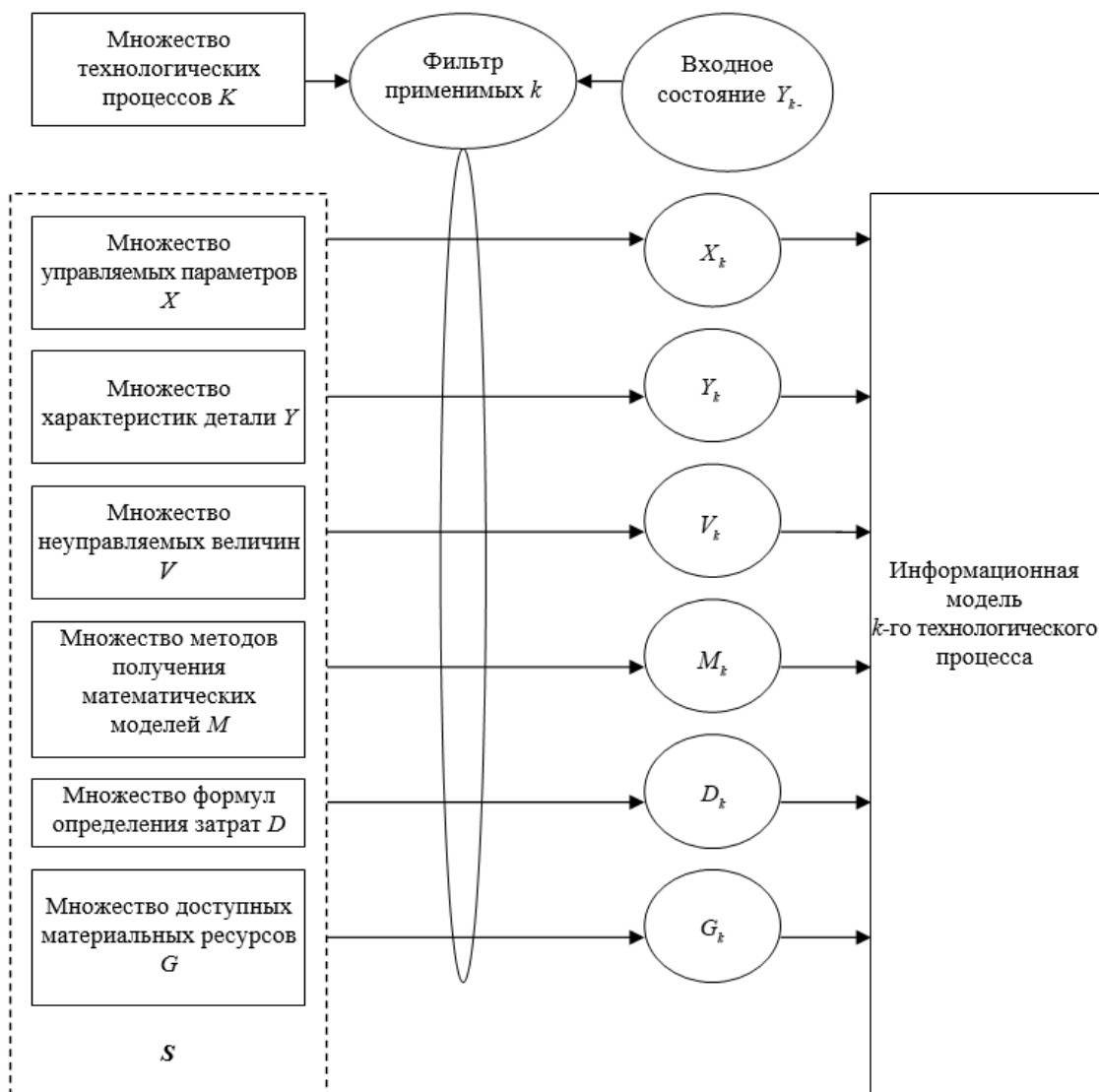


Рисунок 7. – Схема формирования отдельной информационной модели технологического процесса восстановления (упрочнения) методом электродугового напыления на основании общей базы знаний

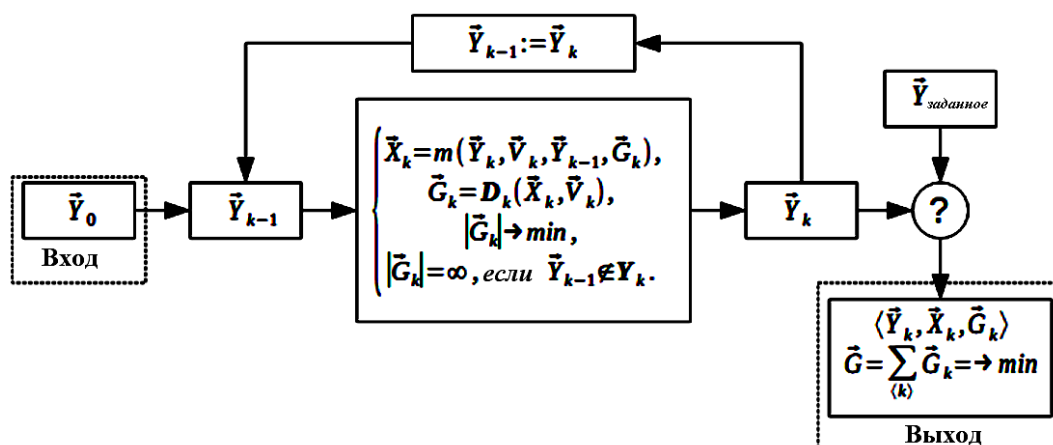


Рисунок 8. – Схема информационной модели построения цепи технологических процессов

В развернутом виде циклическое представление (см. рисунок 8) переходит в определение цепи технологических процессов следующим образом (рисунок 9), где темным цветом обозначены применимые для входного состояния технологические процессы.

Описанный граф является обобщением графа технологии производства на основе процессов механической обработки [3]. В результате совокупность отношений (8)–(10), действие которых представлено графами на рисунках 7–9, составляет обобщенную модель цепи абстрактных технологических процессов.

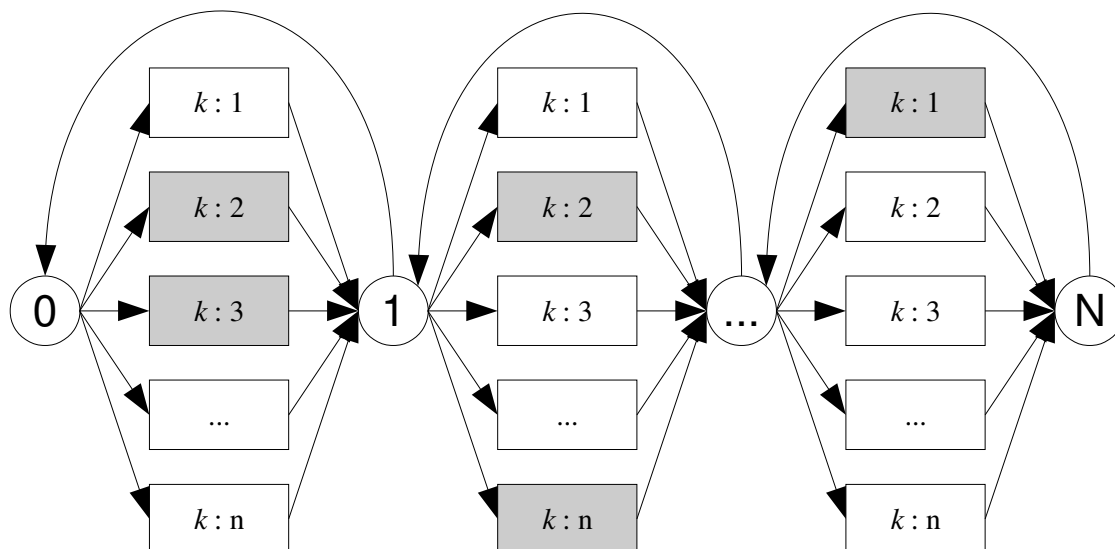


Рисунок 9. – Схема цепи технологических процессов с учетом возможных повторений операций обратными связями

**Выводы.** В работе предложен метод оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхности валов из стали в виде облачного сервиса. Для этого были решены следующие задачи:

- рассмотрен абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу;
- рассмотрена информационная модель технологического процесса и методы ее получения;
- рассмотрены абстрактные экспертные системы и их составляющие;
- проведен обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду;
- предложена формализация подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов;
- предложена формализация рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройка экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.

Таким образом, в виде облачного сервиса предложен метод решения задачи построения оптимизированной цепи технологических процессов восстановления и упрочнения поверхностей валов с выбором более оптимального процесса среди альтернативных по задаче.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вереск, О.М. Технологии поддержки принятия решений / О.М. Вереск. – Львов : Изд-во Львов. политехники, 2013.
2. Хох, В.Д. Исследование методов построения экспертных систем / В.Д. Хох, Е.В. Мелешко, М.С. Якименко // Системы управления, навигации и связи. – 2016. – Вып. 4(40). – С. 48–52.
3. Лимаренко, В.В. Информационная система поддержки решений для автоматизации создания технологических процессов механообработки деталей высокоточного оборудования : дис. ... канд. техн. наук / В.В. Лимаренко. – Харьков, 2019.
4. Брусило, Ю.В. Повышение ресурса авиационной наземной техники усовершенствованием технологии восстановления деталей типа вал : дис. ... канд. техн. наук / Ю.В. Брусилов. – Киев, 2015.

5. Скрипка, К.И. Экспертная система автоматизированного выбора способов восстановления сработанных деталей / К.И. Скрипка, М.А. Зенкин / Вестн. ЖДТУ. Технические науки. – 2004. – № 1 (28). – С. 66–68.

Поступила 18.12.2019

## OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF RESTORING AND STRENGTHENING SURFACES WITH TASKED CHARACTERISTICS AS A CLOUD SERVICE

A. SMYRNOV, T. SMYRNOVA, A. DREEV, A. DUDAN

*The aim of the work is to construct a method for optimizing the technological process of restoration and hardening of surfaces with specified characteristics in the form of a cloud service based on a combination of several technological processes. To achieve the goal of the work, the following tasks were solved: the abstract technological process, its properties and methods of transition to a specific technological process were considered; The information model of the technological process and methods for its preparation are formulated; Abstract expert systems, their components are considered; A review of well-known expert systems for optimizing technological processes, their reduction to an abstract form; subsets of abstract expert systems for optimizing technological processes are formalized; recommendation systems are formalized to ensure the optimization of the technological process chain, as an add-on of an expert system over expert systems of individual technological processes. The results of this work are a method for optimizing the technological process of restoration and hardening of surfaces of parts in the form of a cloud service.*

**Keywords:** cloud service, information technology, expert systems, restoration, hardening, detail, technological process.

УДК 666.3-1-12-127

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ  
МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОРИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

**С.М. АЗАРОВ, А.А. ДРОБЫШ, Д.Н. БАЛЫДКО**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
**Д.Л. ЛЕОНИК**  
(ОАО «ПОЛОЦК-СТЕКЛОВОЛОКНО»)

*Анализируется процесс очистки технической воды многослойными пористыми материалами. Показано, что при фильтрации технической воды алюмосиликатными многослойными пористыми материалами и базальтовым волокном обеспечивается сужение диапазонов после очистки в сторону уменьшения концентрации по цветности, прозрачности, перманганатной окисляемости, ХПК, железу. Амебообразный вид примесей предполагает использование линейных скоростей фильтрации в диапазоне 0,03...0,14 м/мин. При этом ограничение величины рабочего давления величиной 1,3...1,5 атм гарантирует отсутствие продавливания данных агрегированных соединений через поры исследуемых материалов.*

**Ключевые слова:** техническая вода, фильтрация, алюмосиликатный многослойный пористый материал, базальтовое волокно.

**Введение.** Традиционно применяемые на сегодняшний день устройства очистки воды работают в режиме фильтрации, когда частицы загрязнений удерживаются на зернах фильтрующего материала в объеме пористого слоя. В ряде случаев процессы объемной фильтрации не способны обеспечивать требуемый эффект очистки, особенно при использовании водозаборов из поверхностных источников.

Известным техническим решением, позволяющим повысить качество очистки и кардинально уменьшить габариты устройств с одновременным уменьшением расходов на регенерацию, является замена фильтрующих материалов, работающих в режиме объемной фильтрации, на фильтроэлементы, у которых удаляемые загрязнения собираются на поверхности фильтрующей перегородки. В этом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор, а затем из них образуется слой загрязнений, который также является фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для жесткой пористой перегородки толщиной 1...20 мм с размерами пор 1...20 мкм (режим микрофильтрации), организованной в виде пластин или труб различного диаметра (фильтроэлементы), которые работают при малых скоростях фильтрации. Если при работе зернистых загрузок скорости фильтрования обычно составляют 10...25 м/ч, то скорости фильтрования в режиме микрофильтрации не должны превышать 5 м/ч [1]. Накапливающиеся на фильтрующей поверхности загрязнения периодически удаляются в дренаж методом обратной промывки отфильтрованной водой. В известных технических решениях один фильтрующий модуль обрабатывает от 0,02 до 0,5 м<sup>3</sup> жидкости в час [2; 3].

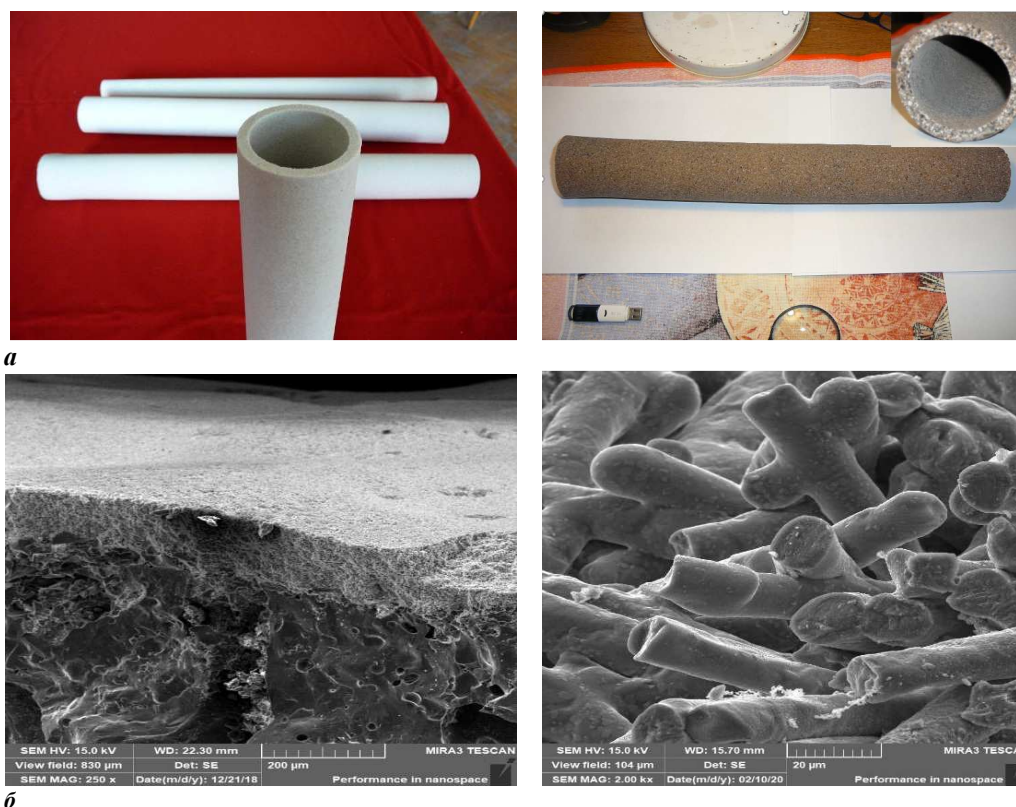
В производственных условиях ОАО «ПОЛОЦК-СТЕКЛОВОЛОКНО» проведены испытания многослойных фильтроэлементов, изготовленных реакционным спеканием на основе алюмосиликатов, и фильтроэлементов из базальтового волокна. Модули использовали для очистки технической воды, предназначенной для отмывки продукции завода до требования ТНПА (технического нормативного правового акта).

Цель данной работы – исследование процесса очистки технической воды трубчатыми фильтроэлементами в режиме микрофильтрации без применения дополнительных химических реагентов.

**Материалы и методики исследований.** Для проведения экспериментов использовали изготовленные из алюмосиликатного порошка многослойные трубчатые фильтроэлементы Ø65 мм и длиной 400...500 мм с толщиной стенки 4 мм. Толщина мембранного слоя, содержащего карбид кремния, составляла 100...200 мкм, размер пор – 4...7 мкм. Фильтроэлементы Ø65мм и длиной 400...500 мм с толщиной стенки 4 мм, изготовленные из базальтового волокна, имели щелевые поры со средним размером менее 20 мкм.

Вид и структура фильтроэлементов представлены на рисунке 1.

После монтажа фильтроэлементов в экспериментальном модуле фильтрацию через образцы проводили снаружи внутрь. Измерения производительности и перепадов давления осуществляли счетчиками воды и манометрами. Определение цветности, мутности, pH, перманганатной окисляемости, концентраций железа и алюминия в воде, химическое потребление кислорода (ХПК) проводили по стандартным методикам.



**а** – вид алюмосиликатных фильтроэлементов (слева) и базальтового волокна (справа);  
**б** – структура материалов фильтроэлементов: алюмосиликатного (слева) и из базальтового волокна (справа)

**Рисунок 1. – Вид и структура фильтроэлементов**

Для оценки изменения перепада давления использовали линейный метод аппроксимации. В силу неизвестности вида аппроксимирующей зависимости в качестве эмпирической формулы был выбран алгебраический многочлен первого порядка

$$F(x) = A_1x + B, \quad (1)$$

где  $F(x)$  – интерполируемая функция;  
 $A_1$  – коэффициент интерполяции;  
 $B$  – остаточный член.

При интерполировании функций использовали условие равенства значений интерполяционного полинома и данной функции в узлах интерполяции. Исходные данные получены в результате опытных измерений, поэтому требуется лишь приближенное выполнение условий интерполяции. Это условие означает, что интерполирующая функция  $F(x)$  проходит не точно через заданные точки, а в некоторой их окрестности. Выбранный метод позволяет оценить тенденцию изменения перепада давления при большом статистическом поле экспериментальных данных, полученных при разных рабочих давлениях и скоростях фильтрации.

После завершения процесса очистки с поверхности мембраны (наружная поверхность фильтроэлемента) снимали осадок и высушивали при температуре 90 °С. Исследование морфологии и элементного состава примесей, собравшихся на поверхности мембраны, проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгено-спектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода в данном случае составляет 3...5 относительных процентов.

Микрорентгеноспектральный анализ образцов (МРСА) проводили по площади (карты характеристического рентгеновского излучения).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В таблице 1 представлены результаты лабораторных исследований по диапазонам колебаний показателей исходной технической воды в период испытаний.

Таблица 1. – Показатели исходной воды

Показатели	Диапазон значений
Взвешенные вещества (мг/дм <sup>3</sup> )	< 3
Цветность (град)	12...95
Прозрачность	10...30
Сухой остаток (мг/дм <sup>3</sup> )	220...250
ХПК (мгО/дм <sup>3</sup> )	11...29
Перманганатная окисляемость (мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> )	4,7...7
Жесткость (мг-экв/дм <sup>3</sup> )	< 3
Железо, общее (мг/дм <sup>3</sup> )	0,07...0,78
Алюминий (мг/дм <sup>3</sup> )	0,2...2,67
pH	6,3...8,0

Как следует из таблицы 1, значительные колебания показателей не гарантируют соответствия продукции ТНПА после отмывки исходной технической водой. Показатели воды после очистки исследуемыми фильтроэлементами представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели воды после очистки

Показатели	Диапазон значений	
	алюмосиликат	базальт
Взвешенные вещества (мг/дм <sup>3</sup> )	< 3	–
Цветность (град)	8...12	–
Прозрачность	> 30	–
Сухой остаток (мг/дм <sup>3</sup> )	203...240	184...199
ХПК (мгО/дм <sup>3</sup> )	9,8...11,5	–
Перманганатная окисляемость (мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> )	3,96...4,40	4,4...5,1
Жесткость (мг-экв/дм <sup>3</sup> )	< 3	< 3
Железо, общее (мг/дм <sup>3</sup> )	0,03...0,19	0,06...0,08
Алюминий (мг/дм <sup>3</sup> )	0,2...2,4	–
pH	6,6...7,2	–

Сравнение диапазонов изменения концентраций в исходной и фильтрованной воде указывает на значительное сужение диапазонов после очистки в сторону уменьшения концентрации по цветности, прозрачности, перманганатной окисляемости, ХПК, железу. Например, для концентрации ХПК дисперсия (степень отклонения значений переменной от средней величины) уменьшается с 0,063 до 0,001. Для концентрации по железу дисперсия уменьшается с 0,057 до 0,012. Наблюдается незначительное уменьшение pH, сухого остатка, цветности, концентрации алюминия. Взвешенные вещества и жесткость остаются практически без изменения.

Поскольку перед поступлением на завод техническая вода на станции осветления подвергается обработке алюминийсодержащими коагулянтами, минимальную растворимость гидроокись алюминия, в которую переходят ионы алюминия при гидролизе алюминийсодержащих коагулянтов при их контакте с обрабатываемой водой, приобретает при нейтральном водородном показателе pH = 6,0...6,5. При таком значении водородного показателя равновесная концентрация ионов алюминия в чистой воде минимальна и составляет менее 0,04 мг/дм<sup>3</sup>.

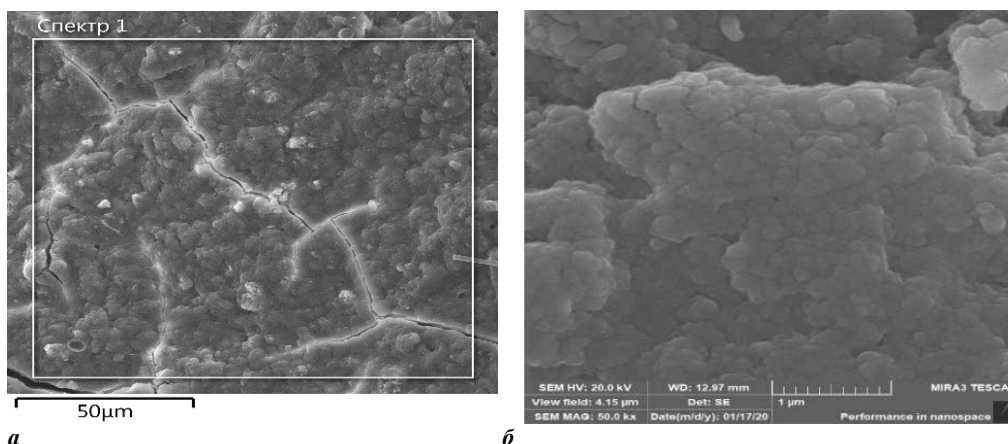
При снижении pH менее 6,0 единиц концентрация растворенного алюминия начинает экспоненциально нарастать. Начиная с pH = 5,7, достигает аналитически заметных значений, а при pH = 5,5 обычно уже преодолевает ПДК. Если же в обработанной коагулянтом природной воде при нейтральном pH в диапазоне 6,0...7,0 обнаруживается достаточно высокая остаточная концентрация алюминия (например, 0,20...0,40 мг/дм<sup>3</sup>), то это говорит о наличии алюминия не в растворенной, а в коллоидной форме. Этим алюминийсодержащим коллоидом могут быть агрегированные соединения частично растворимых комплексов металла (железа) – гуматов алюминия. Причем эти агрегированные соединения, возможно, имеют амебообразный вид с содержанием до 18 молекул структурированной воды на 1 молекулу гидроокиси алюминия [4]. Предположительно, что некоторая критическая концентрация агрегированных соединений создает условия несоответствия продукции ТНПА. Следовательно, после очистки сужение диапазонов в сторону уменьшения концентрации по цветности, прозрачности, перманганатной окисляемости, ХПК, железу приведет к уменьшению концентрации агрегированных соединений и интегрально повысит качество очистки технической воды.

Результаты исследований морфологий и элементного состава примесей, собравшихся на поверхности мембраны, представленные на рисунке 2, подтверждают сделанные предположения.

Структура термически обработанного при температуре 60...70 °C осадка имеет вид глобул со средним размером 0,1...0,4 мкм (рисунок 2, б). Усредненный химический состав осадка указывает на доминирующую роль соединений алюминия и железа на фоне аномально малого количества кремния, большое количество которого характерно для примесей водозаборов поверхностных источников (рису-



нок 2, а). Проведенный анализ указывает, что для успешной очистки исследуемой технической воды амeboобразный вид примесей предполагает использование малых линейных скоростей фильтрации. При этом вид примесей подразумевает и ограничение величины рабочего давления из-за возможности продавливания данных агрегированных соединений через поры даже субмикронного уровня.



а – изображение области осадка с результатами МРСА; б – изображение структуры осадка

Рисунок 2. – Морфология и элементный состав примесей на поверхности мембраны

Результаты гидравлических испытаний по изменению перепада давления на фильтроэлементах в зависимости от ресурса работы при линейных скоростях фильтрации 0,12...0,14 м/мин представлены на рисунке 3. Результаты соответствия продукции ТНПА – в таблице 3.

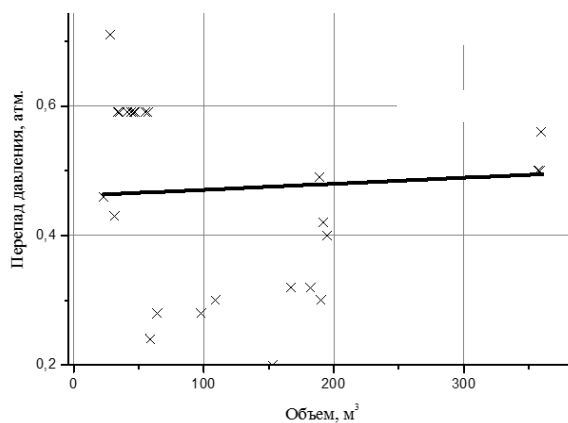


Рисунок 3. – Зависимость перепада давления от ресурса работы на алюмосиликатных фильтроэлементах

Таблица 3. – Данные гидравлических испытаний

Фильтрующий материал	Расход на отмывку, м³	Расход, м³/ч	$P_{ex}$ , атм	$\Delta P$ , атм	Примечание
Алюмосиликат	1,16	1,2	0,9	0,5	продукция* соответствует ТНПА с оценкой не ниже 7 по 10-балльной шкале
	–	–	0,7	0,6	
	0,65	2	0,7	0,56	
	1,2	0,63	1,1	0,78	
Базальт	1,62	1,2	0,8	0,3	продукция* соответствует ТНПА с оценкой не ниже 8 по 10-балльной шкале
	2	1	1,5	1,28	

\* кремнеземное волокно

Согласно представленным результатам многослойная структура алюмосиликатных фильтроэлементов с мембранным слоем (размер пор 4...7 мкм, толщина 100...200 мкм) при линейных скоростях 0,12...0,14 м/мин и перепадом давления в диапазоне 0,4...0,6 атм на пористой перегородке обеспечивает соответствие продукции ТНПА не ниже 7 по 10-балльной шкале. Структура фильтроэлементов из базальтового волокна, характеризующаяся наличием щелевых пор с размерами менее 20 мкм, обеспечивает соответствие продукции ТНПА не ниже 8 по 10-балльной шкале.

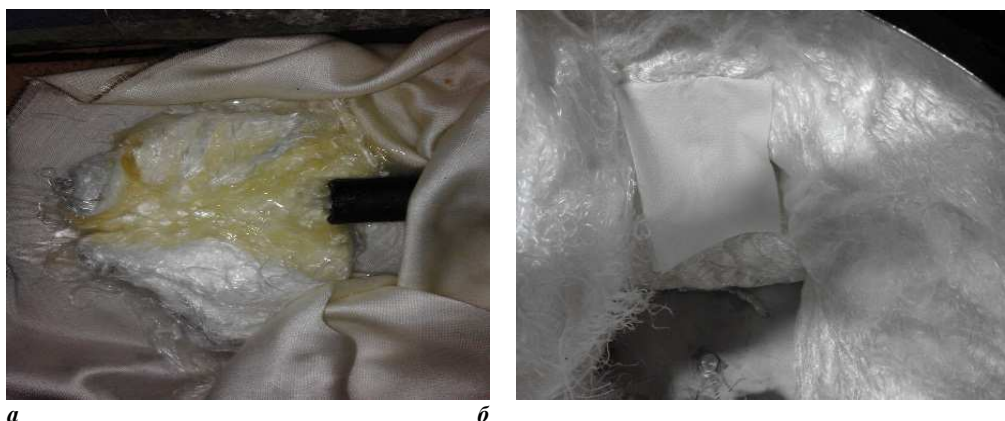
Для проведения опытно-промышленных испытаний из алюмосиликатных фильтроэлементов был собран опытный образец установки с площадью фильтрации 0,8 м<sup>2</sup>. При рабочем давлении до 1,3 атм и скорости фильтрации 0,03...0,07 м/мин на пористой перегородке создавался перепад давления не более 0,3 атм и обеспечивались условия соответствия готовой продукции ТНПА с оценкой не ниже 9 по 10-балльной шкале.

Результаты работы опытного образца установки представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Результаты контрольных испытаний

Ассортимент продукции	Расход воды, м <sup>3</sup>	Степень отмывки
ВК-11(9)	0,9	Готовая продукция (кремнеземное волокно) соответствует ТНПА с оценкой не ниже 9 по 10-балльной шкале
PS-23(9)	1,9	
PS-23(9)	0,8	
PS-23(9)	2,7	
ВК-11(9)	1,2	
PS-23(9)	0,9	
KB-11(6)	1,3	
ВК-11(9)	1,9	

На рисунке 4 представлены образцы продукции после отмывки исходной технической водой и водой, отфильтрованной опытной установкой.



*a* – после отмывки исходной водой;  
*б* – после отмывки водой, отфильтрованной опытной установкой (сравнение с эталоном)

Рисунок 4. – Внешний вид волокна

**Заключение.** Доказана возможность очистки технической воды из водозаборов поверхностных источников многослойными пористыми материалами на основе алюмосиликатов с размерами пор мембранного слоя 4...7 мкм и базальтового волокна со щелеобразными порами размером менее 20 мкм от примесей в виде алюминийсодержащих коллоидных соединений. Амебообразный вид примесей предполагает использование линейных скоростей фильтрации в диапазоне 0,03...0,14 м/мин. При этом ограничение величины рабочего давления величиной 1,3...1,5 атм гарантирует отсутствие продавливания данных агрегированных соединений через поры исследуемых материалов и обеспечивает соответствие готовой продукции ТНПА с оценкой не ниже 7 по 10-балльной шкале.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Драгинский, В.Л. Предложения по повышению эффективности очистки воды при подготовке водоочистных станций к выполнению требований СанПиН 2.1.4.559-96. Питьевая вода. гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. контроль качества [Электронный ресурс] /

- В.Л. Драгинский, В.М. Корабельников, Л.П. Алексеева // База нормативной документации: [www.complexdoc.ru](http://www.complexdoc.ru). – Режим доступа: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/549039/predlozheniya\\_po\\_povysheniyu\\_effektivnosti\\_ochistki\\_vody\\_pri\\_podgotovke.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/549039/predlozheniya_po_povysheniyu_effektivnosti_ochistki_vody_pri_podgotovke.pdf). – Дата доступа: 06.02.2012.
2. Мембранные системы биокон для ультра- и микрофльтрации. Применение в различных отраслях промышленности [Электронный ресурс] // ЗАО «БИОКОН». – Режим доступа: <http://biocon-russia.narod.ru/russian/a1.htm>. – Дата доступа: 08.02.2012.
  3. Применение мембранных керамических фильтров в процессе очистки различных жидкостей и получении питьевой воды [Электронный ресурс] // Портал «ДЕЛОПУС». – Режим доступа: [http://www.delorus.com/every/ooo\\_marinservis/membrannie\\_keromicheskie\\_filtri.php](http://www.delorus.com/every/ooo_marinservis/membrannie_keromicheskie_filtri.php). – Дата доступа: 20.03.2012.
  4. Коагулянты (обзор) – Режим доступа [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0%D1%82\\_%D0%B0%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F/](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0%D1%82_%D0%B0%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F/). – Дата доступа: 20.02.2020.

Поступила 24.02.2020

## A STUDY OF THE PROCESS OF INDUSTRIAL WATER PURIFICATION MULTI-LAYERED POROUS MATERIALS

S. AZARAU, A. DRODYSH, D. BALYDKO, D LEONIK

*The process of process water treatment with multilayer porous materials is analyzed. It is shown that when filtering process water with aluminosilicate multilayer porous materials and basalt fiber, the ranges are narrowed after cleaning in the direction of reducing the concentration of color, transparency, permanganate oxidability, COD, and iron. The amoeboid type of impurities assumes the use of linear filtration rates in the range of 0,03...0,14 m/min. at the same time, the working pressure limit is 1,3...1,5 bar guarantees that these aggregated compounds do not push through the pores of the studied materials.*

**Keywords:** industrial water, filtration, aluminosilicate multilayer porous material, basalt fiber.

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 532.1

### ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА АВАРИЙНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ УСТАНОВКЕ ШАРОВЫХ КРАНОВ

канд. тех. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, В.В. КОЛЕСНИКОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается проблема возникновения аварийных ситуаций на технологических трубопроводах нефтебаз, выполненных наземно и надземно, при замене клиновых задвижек на шаровые краны, а также влияние теплового расширения жидкостей при изменении температуры. Анализируются факторы, влияющие на аварийность технологических трубопроводов, природа и физические свойства теплового расширения жидкости. Определены зависимость повышения давления жидкости в замкнутом объеме при ее тепловом расширении и зависимость повышения давления нефтепродуктов в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении.

**Ключевые слова:** аварийность технологических трубопроводов, тепловое расширение жидкости, замкнутый объем нефтепродукта.

**Введение.** При реконструкции нефтебаз, а именно при замене на технологических трубопроводах клиновых задвижек на шаровые краны, возникают ситуации, приводящие к разрывам трубопровода и запорной арматуры. Статистика показывает ряд таких случаев, происшедших на нефтебазах разных компаний, расположенных на территории Республики Беларусь и за рубежом. Данные аварии происходят на технологических трубопроводах, выполненных наземно и надземно.

Целью исследования вопроса и причин, приводящих к разгерметизации трубопроводов, является изучение влияния шаровых кранов на герметичность технологических трубопроводов.

При исследовании были поставлены следующие задачи:

– определить причины, приводящие к росту давления в технологических трубопроводах, заполненных нефтепродуктом;

– проанализировать природу разрежений, определить ее взаимосвязь с внешними условиями.

В качестве объекта исследований выступает технологический трубопровод. Предметом исследования являются технологические трубопроводы, заполненные нефтепродуктом.

#### Основная часть

*Оценка факторов, влияющих на аварийность технологических трубопроводов при установке шаровых кранов.* Рассмотрим влияние плотности нефти и нефтепродукта на изменение давления.

Физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов, характеризующие возможность транспортировки по трубопроводу, зависят от их состава.

Параметры режимов транспортировки нефти по трубопроводу определяются главным образом плотностью и вязкостью нефти, а также зависимостью этих характеристик от температуры и давления.

Плотность нефти – масса нефти в единице объема. При изменении температуры плотность нефти изменяется: при повышении температуры она уменьшается, при понижении – увеличивается. Зависимость плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) нефти от температуры  $T$  (°C) определяется формулой

$$\rho(T) = \rho_{20} [1 + \xi(20 - T)], \quad (1)$$

где  $\rho_{20}$  – плотность нефти при температуре 20 °C;  
 $\xi$  (1/°C) – коэффициент объемного расширения.

При изменении давления плотность нефти также изменяется. Несмотря на то, что все нефти являются слабосжимаемыми жидкостями, изменение их плотности при изменении давления все же имеется. Плотность нефти при увеличении давления возрастает, а при уменьшении – убывает. Изменения плотности малы по сравнению с ее номинальным значением. Соответствующие поправки необходимо учитывать в приемосдаточных операциях, а также при расчетах волновых процессов в нефтепроводах.

Зависимость плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) нефти от давления  $p$  представляется как

$$\rho(p) = \rho_{20} [1 + \beta(p - p_0)], \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность нефти при стандартных условиях (атмосферном давлении  $p_0$  и температуре  $+20\text{ }^\circ\text{C}$ );  $\beta$  (1/Па) – коэффициент сжимаемости нефти, среднее значение которого составляет 0,00078 МПа.

Для вычисления поправок к плотности на давление используют также модуль упругости  $K$  (Па) нефти, который равен  $1/\beta$ . Тогда формула (2) записывается иначе:

$$\rho(p) = \rho_{20} \left[ 1 + \frac{p - p_0}{K} \right]. \quad (3)$$

В случаях одновременного отклонения от номинальных значений и температуры, и давления, плотность  $\rho(p, T)$  нефти при давлении  $p$  и температуре  $T$  можно рассчитывать по формуле [1]

$$\rho(p, T) = \rho_{20} \left[ 1 + \xi(20 - T) + \frac{p - p_0}{K} \right]. \quad (4)$$

Рассмотрим влияние теплового расширения нефти и нефтепродуктов.

Коэффициентом расширения называется доля единицы объема, на которую происходит расширение данного вещества при нагревании его на  $1\text{ }^\circ\text{C}$ .

Проанализируем расширение в жидкостях, влияние изменения температуры на изменение давления в заполненном нефтепродуктом трубопроводе.

Можно выделить две основных причины.

Во-первых, в жидкостях тепловое движение молекул (атомов) состоит из сочетания колебаний молекул около положений равновесия (как в твердых телах) и происходящих время от времени скачков молекул из одного положения равновесия в другое. Повышение температуры означает увеличение энергии колебаний и, следовательно, рост амплитуды этих колебаний. Если бы колебания молекул были строго гармоническими, то каждая молекула настолько же приближалась бы к одному из своих соседей, насколько удалялась от другого, и увеличение амплитуды ее колебаний не привело бы к изменению среднего межмолекулярного расстояния, а значит, и к тепловому расширению.

В действительности молекулы совершают ангармонические (т.е. негармонические) колебания. Это обусловлено характером зависимости сил взаимодействия между молекулами от расстояния между ними. Зависимость эта такова, что при больших расстояниях между молекулами силы взаимодействия между молекулами проявляются как силы притяжения, а при уменьшении этого расстояния меняют свой знак и становятся силами отталкивания, быстро возрастающими с уменьшением расстояния. Это приводит к тому, что при возрастании амплитуды колебаний молекул вследствие нагревания жидкости рост сил отталкивания между молекулами преобладает над ростом сил притяжения. Другими словами, молекуле «легче» удалиться от соседа, чем приблизиться к другому. Это, конечно, должно привести к увеличению среднего расстояния между молекулами, т.е. к увеличению объема жидкости при его нагревании. Отсюда следует, что причиной теплового расширения жидкостей (и твердых тел) является негармоничность колебаний молекул.

Во-вторых, в жидкости существуют микропустоты – пространства, где отсутствуют молекулы. При нагревании жидкости концентрация этих микропустот растет, что приводит к увеличению объема жидкости [2].

Для различных случаев расширения нефтепродуктов от изменения температуры с достаточной точностью можно пользоваться следующей формулой теплового расширения:

$$V_1 = V_0 [1 + \xi(t)], \quad (5)$$

где  $V_1$  – конечный объем при температуре  $t$ ;

$V_0$  – объем жидкости при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\xi$  – коэффициент объемного расширения продукта.

Коэффициент объемного расширения определяется в зависимости от удельного веса жидкости.

Тепловое расширение нефтепродуктов вызывает резкий рост давления в закрытом сосуде. Известно, что нагрев парафинистого мазута в закрытом сосуде с  $20$  до  $39\text{ }^\circ\text{C}$  или керосина с  $20$  до  $52\text{ }^\circ\text{C}$  вызывает повышение давления до  $250$  атм. В результате резких изменений температуры наружного воздуха в трубопроводах, заполненных продуктами, развиваются высокие давления, приводящие к разрыву задвижек или трубопроводов [3].

Рассмотрим влияние конструктивных особенностей шарового крана на аварийность технологических трубопроводов при их установке.

Кран – запорное устройство, в котором подвижная деталь затвора (пробка) имеет форму тела вращения с отверстием для пропуска погона, для перекрытия которого вращается вокруг своей оси.

Любой кран имеет две основные детали: неподвижную (корпус) и вращающуюся (пробку).

Однако краны классифицируют и по другим конструктивным признакам, например, по способу создания удельного давления на уплотнительных поверхностях, по форме окна прохода пробки, по числу проходов, по наличию или отсутствию сужения прохода, по типу управления и привода, по материалу уплотнительных поверхностей и т.д.

Достоинством шаровых кранов считают плотность уплотнений штока. Шаровые краны являются так называемыми четвертьоборотными вентилями. При этом шток не совершает линейного перемещения, как, например, в задвижках. Линейное перемещение добавляет риск протечки уплотнений штока, поскольку по мере линейного движения штока загрязнениям легче проникнуть в уплотнение и повредить их. В четвертьоборотных ventилях уплотнения в зависимости от типа вентилля остаются в течение всего времени работы защищенными [4].

Если сравнивать два этих запорных органа между собой, шаровой кран более герметичный. Доказательством этому является анализ нормативного документа ГОСТ 9544-2005 «Арматура трубопроводная. Классы и нормы герметичности затворов» [5]. Классы герметичности трубопроводной арматуры представлены в таблице.

Таблица. – Классы герметичности трубопроводной арматуры

А	Отсутствие видимых утечек
В	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального
В1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением 0,6 МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением
С	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального
С1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением 0,6 МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением
Д	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального
Д1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением 0,6 МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением или водой с давлением, равным 1,1 от номинального, или водой с давлением, равным 1,1 от номинального

Таким образом, герметичность шарового крана относится к классу А, клиновой задвижки – к классу В, т.е. допускаются утечки при испытаниях воздухом с давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального.

*Аналитическое выражение роста давления в трубопроводе при тепловом расширении жидкости.* При анализе разрывов технологических трубопроводов после замены клиновых задвижек на шаровые краны были проанализированы следующие причины: физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов, тепловое расширение нефти и нефтепродуктов, конструктивные особенности шарового крана. В результате было установлено, что наиболее вероятной причиной является тепловое расширение жидкости.

Рассмотрим задачу о нагревании жидкости в виде плоского слоя толщиной  $2b$  либо в виде цилиндрической или сферической области радиусом  $b$  через боковые стенки. Нагревание происходит с поверхности  $r = b$  за счет поддержания заданной температуры. При отсутствии кипения жидкости повышение давления будет происходить только за счет термического расширения по всему объему ( $0 < r < b$ ), где  $r = 0$  – координата оси или центра симметрии.

Для теоретического описания процесса повышения давления в объеме при нагреве запишем уравнения неразрывности, теплопроводности и состояния жидкости в линейном приближении:

$$\left(\frac{\partial p_l}{\partial t}\right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho_l v_r) = 0, \quad (6)$$

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \frac{\partial T_l}{\partial r} \right), \quad (7)$$

$$\rho_l = \rho_{l0} (1 - \alpha^{(T)} (T_l - T_{l0}) + \alpha^{(p)} (p - p_0)). \quad (8)$$

где  $\rho_b, \lambda_b, c_b, v_b, T_b, p$  – плотность, теплопроводность, теплоемкость, скорость, температура и давление жидкости; нижний индекс 0 здесь и далее соответствует начальным значениям параметров жидкости;

$\alpha^{(T)}$  – коэффициент термического расширения жидкости;

$\alpha^{(p)} = 1/(\rho_{i0} C_i^2)$  – коэффициент сжимаемости, определяемый скоростью звука в жидкости  $C_i$ ;

$n = 0, 1$  и  $2$  соответствует плоской, радиальной и сферической геометрии задачи.

Пусть в исходном состоянии ( $t < 0$ ) температура жидкости равна  $T_0$ , а давление  $p_0$ . С некоторого момента времени  $t = 0$  на границе  $r = b$  поддерживается постоянная температура  $T_e$ , которая выше начальной температуры  $T_0$ . При этом на оси симметрии емкости ( $r = 0$ ) выполняется условие отсутствия тепловых потоков ( $\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0$ ).

При гипотезе однородности давления (условие гомобаричности  $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$ ) из уравнения неразрывности (6) и теплопроводности (7) с учетом линейного уравнения состояния (8) можно получить

$$\alpha^{(p)} r^n \frac{dp}{dt} = \alpha^{(T)} v_i^{(T)} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \frac{\partial T_i}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial r} (r^n v_i), \quad (9)$$

где  $v_i^{(T)} = \lambda_i / (\rho_i c_i)$  – температуропроводность жидкости.

Учитывая, что скорость жидкости на границах  $r = 0$  и  $r = b$  равна нулю, интегрирование уравнения (9) по координате от 0 до  $b$  приводит к следующему дифференциальному уравнению для изменения давления жидкости:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(n+1)\alpha^{(T)} v_i^{(T)}}{\alpha^{(p)} b} \left( \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \Big|_{r=b}. \quad (10)$$

Для задания теплового потока на границе  $r = b$  необходимо найти решение уравнения теплопроводности, удовлетворяющее условиям  $T_i = T_0$  ( $t = 0, 0 < r < b$ ),  $\partial T_i / \partial r = 0$  ( $t > 0, r = 0$ ),  $T_i = T_e$  ( $t > 0, r = b$ ). Подставив их в уравнение (10), для  $n = 0, 1$  и  $2$  соответственно получим:

$$p = p_0 + \frac{8\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)}\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \left[ 1 - e^{-v_i^{(T)}(2m+1)^2 \pi^2 t / (4b^2)} \right], \quad (11)$$

$$p = p_0 + \frac{4\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)} b^2 \sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2} \left[ 1 - e^{-v_i^{(T)} \alpha_m^2 t} \right], \quad (12)$$

$$p = p_0 + \frac{6\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)}\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left[ 1 - e^{-v_i^{(T)} m^2 \pi^2 t / b^2} \right]. \quad (13)$$

Следует отметить, что из решений (11)–(13) можно получить предварительные предельные оценки роста давления  $p^{(M)}$  предельным переходом при  $t \rightarrow \infty$  или из уравнения состояния, полагая  $T_i = T_0$  и  $\rho_i = \rho_0$ .

$$p^{(M)} = p_0 + \frac{\alpha^{(T)}}{\alpha^{(p)}} (T_e - T_0). \quad (14)$$

В численных расчетах применительно к воде использовались следующие физические параметры [8]:  $\alpha^{(T)} = 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha^{(p)} = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ ,  $v_i^{(T)} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Для начального состояния приняты значения температуры и давления воды  $T_0 = 293 \text{ К}$ ,  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ , температура на границе равна  $T_e = 353 \text{ К}$ .

На рисунке представлены зависимости давления от времени, иллюстрирующие влияние линейных размеров замкнутого объема. Здесь сплошная, штрихпунктирная и точечная линии соответствуют случаям плоской, радиальной и сферической геометрии задачи. Штриховая линия, выполненная по формуле (14), соответствует величине максимального давления жидкости в замкнутом объеме.

При нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению. Величина максимального давления не зави-

сит от геометрического размера емкости, а зависит от начальных температур границы и воды. Геометрической размер емкости влияет на темп повышения давления.

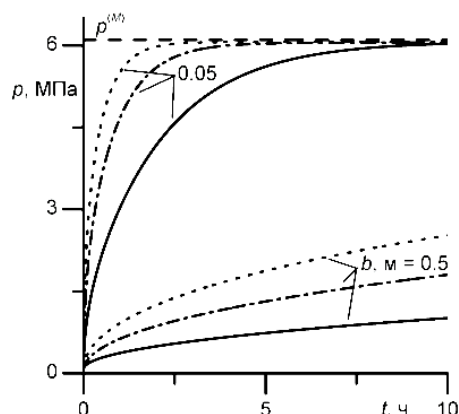


Рисунок. – Динамика роста давления вследствие термического расширения воды при различных значениях полуширины или радиуса  $b$

Рассмотрим повышение давления нефтепродукта в замкнутом трубопроводе при термическом расширении.

Участок трубопровода, заполненный нефтепродуктом, который с двух сторон закрыт шаровыми кранами. Данный вид арматуры относится к классу герметичности А, поэтому участок можно считать замкнутым.

Если участок трубопровода полностью заполнен жидкостью, находящейся под давлением  $p_1$  и имеющей температуру  $T_1$ , то масса жидкости в нем рассчитывается следующим образом:

$$\rho_1 = \rho_{20} \left[ 1 + \xi(20 - T) - \frac{p_{амм} - p_1}{K} \right]. \quad (15)$$

Объем участка трубопровода будет равен

$$V_1 = V_0 \left[ 1 + \alpha_T(20 - T) - \frac{d_0}{\delta E} (p_{амм} - p_1) \right], \quad (16)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент теплового расширения металла;

$d_0$  – номинальный диаметр трубопровода;

$E$  – модуль Юнга;

$\delta$  – толщина стенки трубопровода.

Масса нефтепродукта

$$M_1 = \rho_1 V_1 = \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - \left( \frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{амм} - p_1) \right]. \quad (17)$$

При повышении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  плотность  $\rho_2$  и объем  $V_2$  равны соответственно

$$\rho_2 = \rho_{20} \left[ 1 + \xi(20 - T_2) - \frac{p_{амм} - p_2}{K} \right], \quad (18)$$

$$V_2 = V_0 \left[ 1 + \alpha_T(20 - T_2) - \frac{d_0}{\delta E} (p_{амм} - p_2) \right]. \quad (19)$$

Масса нефтепродукта

$$M_2 = \rho_2 V_2 = \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - \left( \frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{амм} - p_2) \right]. \quad (20)$$



Масса нефтепродукта – величина постоянная, следовательно,  $M_1 = M_2$ . Тогда

$$\begin{aligned} \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - \left( \frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{амм} - p_1) \right] &= \\ = \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - \left( \frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{амм} - p_2) \right], & \\ p_2 - p_1 &= \frac{\xi - \alpha_T}{\frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E}}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$p_2 = p_1 + \frac{\xi - \alpha_T}{\frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E}}. \quad (22)$$

Полученная зависимость показывает, что при увеличении температуры давление жидкости в трубопроводе увеличивается.

**Заключение.** По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Плотность нефти и нефтепродуктов и давление тесно связаны между собой. При повышении плотности происходит повышение давления в трубопроводе.
2. Тепловое расширение нефти и нефтепродуктов вызывает увеличение объема продукта в замкнутом трубопроводе, а следовательно, и рост давления.
3. В результате резких изменений температуры наружного воздуха в трубопроводах, заполненных продуктами, развиваются высокие давления, приводящие к разрыву задвижек или трубопроводов.
4. Шаровой кран относится к классу герметичности А, клиновая задвижка – к классу В, т.е. допускаются утечки при испытаниях воздухом с давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального.

Таким образом, при замене клиновых задвижек на шаровые краны в технологическом трубопроводе будет возникать избыточное давление, которое может привести к разрывам трубопровода. Рост давления обусловлен тепловым расширением жидкостей при резких изменениях температуры (весенне-осенний период), а также в силу того, что шаровой кран принадлежит к классу герметичности А, что не означает отсутствие утечек жидкости. Данная проблема актуальна для складов хранения нефти и нефтепродуктов, особенно в весенне-осенний период, поэтому необходимо изучить данную проблему и разработать перечень мероприятий, предотвращающих возникновение аварийных ситуаций.

По результатам проведенных аналитических вычислений можно сделать следующие выводы:

1. Определена зависимость повышения давления жидкости в замкнутом объеме при ее тепловом расширении.
2. При нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению.
3. Величина максимального давления не зависит от геометрического размера емкости, но зависит от начальных температур границы и воды.
4. Геометрической размер емкости влияет на темп повышения давления.
5. Определена зависимость роста давления нефти и нефтепродуктов в замкнутом трубопроводе при расширении, которая показывает, что при увеличении температуры давление жидкости в трубопроводе увеличивается на величину согласно зависимости (22).

На основании проведенных аналитических расчетов были выявлены зависимости, определяющие величину повышения давления в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении нефти и нефтепродуктов. На основании полученных выводов будут произведены практические расчеты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трубопроводный транспорт нефти : в 2 т. / сост.: Г.Г. Васильев [и др.]. – М. : Недра Бизнесцентр, 2002. – Т. 1. – 407 с.
2. Кикоин, А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин ; под ред. В.А. Григорова. – М. : Наука, 1976. – 480 с.
3. Оленев, Н.М. Хранение нефти / Н.М. Оленев. – Л. : Недра, 1964. – 436 с.
4. Машины и оборудование газонефтепроводов : учеб.-метод. комплекс / сост. П.В. Коваленко, Н.Н. Пистуневич ; под общ. ред. П.В. Коваленко. – 3-е изд., перераб. – Новополюк : ПГУ, 2009. – 510 с.

5. Государственная система стандартизации Республики Беларусь. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов : ГОСТ 9544-2015. – Введ. 01.07.17. – Минск : Госстандарт ; Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2017. – 56 с.
6. Краслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Краслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
7. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред : в 2 ч. / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

Поступила 28.11.2019

## ASSESSMENT OF FACTORS INFLUENCING THE EMERGENCY OF TECHNOLOGICAL PIPELINES WHEN INSTALLING BALL VALVES

*L. SPIRIDENOK, V. KOLESNIKOVICH*

*The article discusses the problem of emergencies at technological pipelines of oil depots, made above-ground, when replacing wedge gate valves with ball valves. The purpose of the study is identified. The authors determined the subject and object of the study, set tasks to determine the factors affecting the accident rate of technological pipelines, and also determined the causes of emergencies. The article considers factors affecting the breakdown rate of technological pipelines, the nature and physical properties of thermal expansion of a liquid. The authors considered the problem of emergencies at technological pipelines of oil depots made in the above-ground version, and also the effect of thermal expansion of liquids with temperature. The article defines the dependence of the increase in liquid pressure in a closed volume during its thermal expansion and the dependence of the increase in oil pressure in a closed pipeline during thermal expansion.*

**Keywords:** *accident rate of technological pipelines, thermal expansion of a liquid, closed volume of oil product.*

УДК 532.77+541.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОБЪЕМНЫХ СВОЙСТВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ФОРМИАТА НАТРИЯ

канд. хим. наук, доц. П.А. ГАЛУШКОВ, канд. хим. наук, доц. Е.В. МОЛОТОК  
(Полоцкий государственный университет)

*Исследована зависимость плотности водных растворов формиата натрия от концентрации и температуры. Рассчитаны кажущиеся молярные объемы и гидратные числа, парциальные молярные объемы соли и воды, коэффициенты термического расширения растворов формиата натрия.*

**Ключевые слова:** плотность, раствор, формиат натрия, парциальные и кажущиеся молярные объемы, коэффициенты термического расширения растворов.

Изучение объемных свойств растворов имеет большое практическое и теоретическое значение, т.к. данные о плотностях и коэффициентах термического расширения широко используются в различных технических и технологических расчетах, а также позволяют сделать определенные выводы о характере взаимодействия между его составными частями [1–7].

**Описание метода.** В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны водные растворы формиата натрия. Этот выбор обусловлен, с одной стороны, интересом к изучению свойств растворов солей органических кислот, а с другой – получением необходимых для технических расчетов характеристик растворов формиата натрия, который применяется в кожевенной, текстильной промышленности, в нефтедобыче, фармацевтике, сельском хозяйстве, строительстве [8]. В литературных источниках данные по объемным свойствам водных растворов формиата натрия носят ограниченный характер [9; 10].

В данной работе приводятся результаты измерения плотности водных растворов формиата натрия в интервале температур 283...318 К и концентраций 5,14...39,79% ( $\omega_2$  масс.).

Для приготовления растворов использовали дважды перегнанную воду и формиат натрия квалификации «х. ч.». Плотность растворов определяли пикнометрическим методом при температурах 283, 288, 298, 303, 308, 313, 318 К. Термостатирование проводили с точностью  $\pm 0,05$  К. Пикнометры взвешивали с точностью  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  г.

Экспериментальные значения плотности ( $\rho$ ) растворов формиата натрия приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения плотности водных растворов формиата натрия в зависимости от массовой концентрации (%) и температуры (К)

$\omega_2, \%$	T, K						
	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
5,14	1,0338	1,0324	1,0292	1,0275	1,0259	1,024	1,0225
10,19	1,0675	1,0653	1,0618	1,0598	1,0578	1,0556	1,0536
15,26	1,1019	1,1	1,095	1,0929	1,0907	1,0883	1,086
20,49	1,1383	1,1358	1,1306	1,1282	1,1257	1,1232	1,1204
25,33	1,173	1,1703	1,1648	1,1624	1,1598	1,1569	1,1543
30,36	1,21	1,2071	1,2013	1,1985	1,1958	1,1926	1,1899
39,79	1,2817	1,2786	1,2724	1,2692	1,2662	1,2631	1,2599

На основании экспериментальных данных определены кажущиеся молярные объемы ( $\Phi$ ) формиата натрия по формуле [11]

$$\Phi = \frac{1000 \cdot (\rho_0 - \rho)}{C_2 \cdot \rho_0} + \frac{M_2}{\rho_0}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность раствора формиата натрия;

$\rho_0$  – плотность воды;

$M_2$  – молярная масса формиата натрия;

$C_2$  – молярная концентрация раствора формиата натрия.

Проведенный регрессионный анализ полученных данных с помощью табличного процессора Microsoft Excel показал линейную зависимость плотности водных растворов формиата натрия

как от концентрации ( $\omega_2$ , масс.%), так и от температуры ( $T$ , К) в изученном интервале. Об этом свидетельствуют значения коэффициентов детерминации, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. – Коэффициенты достоверности аппроксимации (коэффициенты детерминации) для зависимостей плотности раствора формиата натрия  $\rho$  от  $\omega_2$  и  $T$

$\omega_2$ , %	5,14	10,19	15,26	20,49	25,33	30,36	39,79
$R^2(T, K)$	0,9991	0,9989	0,9994	0,9998	0,9997	0,9998	0,9999
$T$ , К	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
$R^2(\omega_2)$	0,9993	0,9992	0,9990	0,9990	0,9990	0,9990	0,9990

Примечание.  $R^2(\omega)$  – для уравнения  $\rho = A \cdot \omega_2 + B$ ;  $R^2(T)$  – для уравнения  $\rho = A' \cdot T + B'$ .

Значения кажущихся молярных объемов формиата натрия приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Кажущиеся молярные объемы формиата натрия в воде при различных температурах и концентрациях

$T$ , К \ $\omega_2$ , %	$\Phi \cdot 10^3$ , л·моль <sup>-1</sup>						
	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
5,14	24,39	25,37	26,76	27,12	27,09	27,17	27,09
10,19	25,93	26,57	27,40	27,74	27,95	28,16	27,95
15,26	26,68	27,15	28,22	28,47	28,68	28,88	28,68
20,49	27,60	28,08	28,88	29,13	29,36	29,53	29,36
25,33	28,35	28,76	29,43	29,62	29,81	30,02	29,81
30,36	29,09	29,44	30,01	30,23	30,40	30,61	30,40
39,79	30,42	30,68	31,12	31,31	31,46	31,60	31,46

Из таблицы 3 следует, что кажущиеся молярные объемы формиата натрия в воде с увеличением массовой доли соли в растворе от 5,14 до 39,79% в интервале температур от 283,15 К до 298,15 К уменьшаются с 24,7 до 16,3%; начиная от 303,15 К это изменение остается практически постоянным. Вероятно, это свидетельствует о некоторой стабилизации структурных изменений при дальнейшем повышении температуры.

С помощью регрессионного анализа нами установлено, что кажущиеся молярные объемы формиата натрия в воде с более высокой точностью воспроизводятся расширенным уравнением Мэссона для шкалы массовых долей [12]

$$\Phi = \Phi_0 + A \cdot \omega_2^{0,5} + B \cdot \omega_2. \quad (2)$$

В таблице 4 приведены коэффициенты  $\Phi_0$ ,  $A$  и  $B$  этого уравнения, а также коэффициенты детерминации для этой зависимости.

Таблица 4. – Параметры  $\Phi_0$ ,  $A$ ,  $B$  и коэффициенты детерминации для уравнения (3)

$T$ , К	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
$\Phi_0$	21,67	23,51	25,49	26,06	25,44	25,17	25,44
$A$	11,64	6,86	3,56	2,49	6,18	8,25	6,18
$B$	3,41	7,12	8,5	9,23	5,26	2,99	5,26
$R^2$	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

В работе [12] В.П. Королев предложил использовать объемные свойства растворов солей для исследования их гидратации. Его методика позволяет рассчитать гидратные числа, используя формулу

$$n = \frac{\Phi - V_{in}}{\Delta V_h}, \quad (3)$$

где  $V_{in} = \Phi_0 + A + B$ ;  $V_h = -(M_1 / M_2) \cdot (0,5A + B)$ ;

$M_1$  и  $M_2$  – молярные массы воды и формиата натрия соответственно.

С использованием данных таблиц 3 и 4 по формуле (3) рассчитаны гидратные числа формиата натрия, приведенные в таблице 5.

Таблица 5. – Гидратные числа формиата натрия в растворах при различной температуре и их молярности ( $C_m$ )

$C_m$ , моль/кг	$n$						
	283,15 К	288,15 К	298,15 К	303,15 К	308,15 К	313,15 К	318,15 К
0,7966	5,0	4,6	4,1	3,9	3,9	3,9	3,9
1,6685	4,1	3,9	3,6	3,5	3,4	3,3	3,4
2,6473	4,0	3,8	3,4	3,3	3,3	3,2	3,3
3,7887	3,7	3,5	3,2	3,1	3,0	3,0	3,0
4,9881	3,9	3,7	3,4	3,3	3,2	3,1	3,2
6,4115	3,9	3,7	3,4	3,3	3,2	3,1	3,2
9,7202	2,9	2,8	2,6	2,5	2,5	2,4	2,5

Как видно из таблицы 5, гидратные числа закономерно уменьшаются с увеличением концентрации соли, что можно связать с уменьшением количества свободных молекул воды в растворе. Уменьшение гидратных чисел с увеличением температуры объясняется разрушением структурных образований из-за усиления теплового движения частиц. Выше температуры 303,15 К эти разрушения, по-видимому, стабилизируются, о чем свидетельствует наблюдаемое равенство гидратных чисел при одинаковых концентрациях в интервале температур 303,15 – 318,15 К.

Для выявления вклада соли и растворителя в свойства раствора нами были рассчитаны парциальные молярные объемы формиата натрия  $\bar{V}_2$  и воды  $\bar{V}_1$  с помощью формул, предложенных Дж. Ньюменом [13]:

$$\bar{V}_2 = \frac{M_2 - \frac{d\rho}{dc}}{\rho - c \cdot \frac{d\rho}{dc}}, \quad (4)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{M_1}{\rho - c \cdot \frac{d\rho}{dc}}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность раствора;  
 $c$  – молярная концентрация раствора;

$\frac{d\rho}{dc}$  – производная.

Данные по вкладу соли и растворителя в свойства раствора приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. – Парциальные молярные объемы формиата натрия в воде при различных его концентрациях (молярных долях  $X_2$ ) и температурах (К).

$X_2 T, K$	$\bar{V}_2 \cdot 10^3, \text{ л/моль}$						
	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
0,01414	26,94	27,36	28,19	28,37	28,67	29,00	29,37
0,02916	27,92	28,29	28,99	29,16	29,44	29,73	30,06
0,04548	28,92	29,24	29,84	29,99	30,23	30,49	30,77
0,06384	30,00	30,27	30,74	30,88	31,09	31,30	31,53
0,08239	31,03	31,24	31,59	31,70	31,88	32,06	32,23
0,10347	32,10	32,26	32,48	32,58	32,72	32,87	32,99
0,14891	34,07	34,13	34,14	34,22	34,29	34,37	34,40

Как видно из таблицы 6, при всех температурах с увеличением молярной доли соли происходит увеличение парциальных молярных объемов формиата натрия. При этом степень этого увеличения снижается с возрастанием температуры (с 26,5% при 283,15 К до 17,1% при 318,15 К). Чувствительность к повышению температуры с увеличением концентрации соли от 0,01414 до 0,14891 молярных долей понижается с 9% при 283,15 К до 1% при 318,15 К. Это свидетельствует о характере происходящих структурных изменениях в системе – разрушении структуры воды за счет процессов гидратации с образованием гидратированных ионов и одновременным усилением теплового движения частиц с увеличением температуры. Эти явления оказывают определенное влияние на характер изменения величин парциальных молярных объемов как формиата натрия, так и воды.

Таблица 7. – Парциальные молярные объемы воды в растворах формиата натрия при различных его концен трациях (молярных долях  $X_2$ ) и температурах (К)

$X_2T, K$	$\tilde{V}_1 \cdot 10^3, \text{ л/моль}$						
	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
0,01414	17,97	17,99	18,03	18,06	18,08	18,11	18,14
0,02916	17,95	17,96	18,00	18,04	18,06	18,09	18,12
0,04548	17,90	17,92	17,98	18,01	18,03	18,06	18,09
0,06384	17,84	17,87	17,93	17,96	17,99	18,02	18,05
0,08239	17,76	17,79	17,86	17,89	17,92	17,96	17,99
0,10347	17,66	17,69	17,77	17,81	17,84	17,88	17,92
0,14891	17,36	17,41	17,52	17,57	17,61	17,66	17,71

Сравнение характера изменения парциальных молярных объемов воды в растворе с изменением концентрации соли и температуры показывает (см. таблицу 7), что при увеличении концентрации (в молярных долях) от  $X_2 = 0,01414$  до  $0,14891$   $\tilde{V}_1$  уменьшается всего на 1% (с 3,4% до 2,4%), а при увеличении температуры от 283,15 до 318,15 К увеличивается примерно на 1% ( $X_2 = 0,01414$  до  $0,14891$ ).

Таким образом, проведенное сравнение, которое можно также проиллюстрировать рисунком 1, свидетельствует о более сильном влиянии соли на происходящие процессы, связанные со структурными изменениями в растворе.

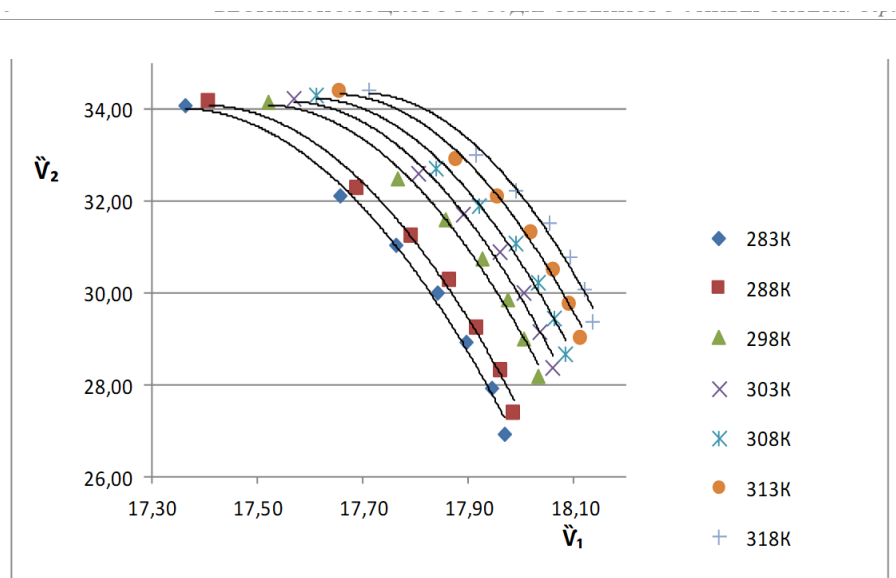


Рисунок 1. – Взаимная зависимость парциальных молярных объемов воды и соли в растворе

Крестов Г.А. [14] предложил ввести для парциальных молярных величин своеобразный коэффициент активности  $\Upsilon$ , равный отношению парциального молярного свойства рассматриваемого компонента в идеальном растворе к его молярному свойству в реальном:

$$\Upsilon = \frac{\bar{V}_2^0}{\Phi_2} = \frac{\Phi_0}{\Phi_2}, \quad (6)$$

где  $\bar{V}_2^0$  – парциальный молярный объем формиата натрия в идеальном растворе ( $\omega_2 = 0$ ), равный параметру  $\Phi_0$  в уравнении (2);

$\Phi_2$  – кажущийся молярный объем формиата натрия в воде.

Эти коэффициенты активности являются мерой отклонения свойства компонента в реальном растворе по отношению к идеальному. Как видно из рисунка 2, различие увеличивается с повышением концентрации соли. Это связано с возрастанием, с одной стороны, эффекта разрушения первоначальной структуры растворителя, а с другой – с процессами гидратации ионов, приводящими к некоторому упорядочению структуры раствора. Повышение температуры сглаживает это различие.

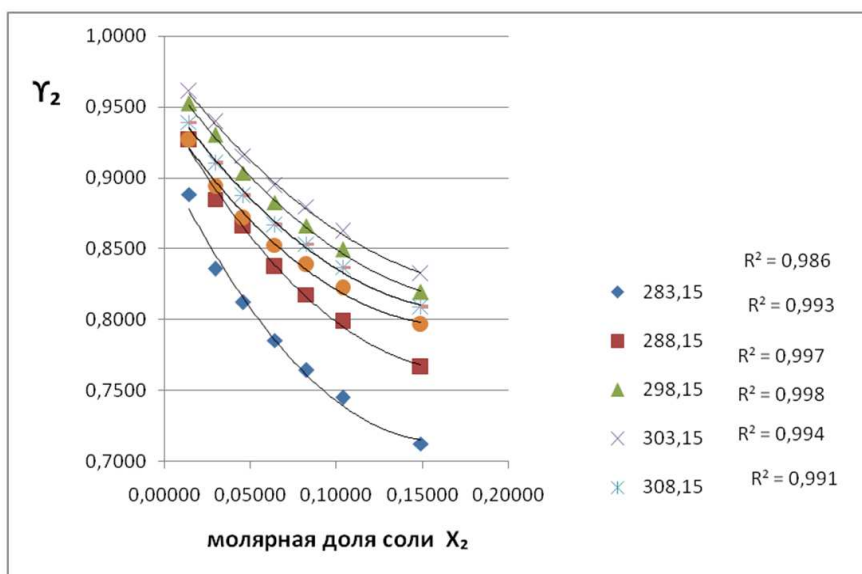


Рисунок 2. – Зависимость коэффициента активности  $\Upsilon_2$  от молярной доли формиата натрия в водном растворе

В работе [15] также отмечается факт влияния на структуру растворителя не только интенсивности теплового движения его молекул, но и соли в процессе образования раствора. Это проявляется в концентрационной и температурной зависимости коэффициентов термического расширения растворов, которые рассчитываются по формуле [15]

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}. \quad (7)$$

В таблице 8 приведены значения  $\alpha$  для водных растворов формиата натрия в интервале температур 283,15...318,15 К.

Таблица 8. – Значения коэффициентов термического расширения водных растворов формиата натрия при различных концентрациях и температурах

$\omega^2, \%$	$T, K$	$\alpha \cdot 10^5, K^{-1}$						
		283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
5,14		31,63	31,67	31,77	31,82	31,87	31,93	31,98
10,19		36,81	36,89	37,01	37,08	37,15	37,23	37,30
15,26		41,56	41,64	41,83	41,91	41,99	42,08	42,17
20,49		44,63	44,73	44,93	45,03	45,13	45,23	45,34
25,33		45,44	45,54	45,76	45,85	45,96	46,07	46,18
30,36		47,52	47,63	47,86	47,98	48,08	48,21	48,32
39,79		48,53	48,65	48,88	49,01	49,12	49,24	49,37

Характер зависимости коэффициентов термического расширения водных растворов формиата натрия от концентрации и температуры представлен на рисунке 3.

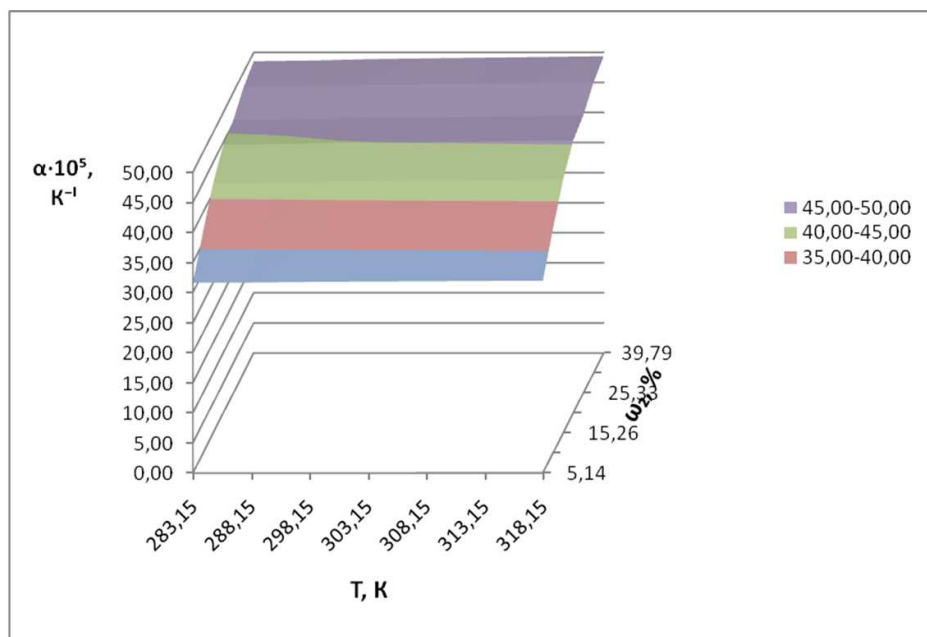


Рисунок 3. – Зависимость коэффициентов термического расширения водных растворов формиата натрия от концентрации и температуры

Для исключения маскирующего влияния собственных масс молекул растворителя, согласно [15], для определения характера влияния электролита на объемные свойства растворов целесообразно использовать вместо  $\alpha$  разность:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент термического расширения растворителя.

Коэффициенты термического расширения воды, необходимые для проведения расчета  $\Delta\alpha$  по формуле (9), получены с использованием значений ее плотности в температурном интервале (283,15K – 318,15K), взятые из литературного источника [16]. Данные представлены в таблице 9.

Таблица 9. – Значения плотности воды и ее коэффициент термического расширения при различных температурах

T, K	283,15	288,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15
$\rho$ , кг/л	0,99973	0,99913	0,99707	0,99567	0,99406	0,99224	0,99025
$\alpha \cdot 10^5$ , K <sup>-1</sup>	33,16	38,18	48,29	53,38	58,50	63,64	68,82

На рисунке 4 приведена зависимость  $\Delta\alpha$  от молярной доли формиата натрия  $X_2$  для изученного интервала температур.

Величина  $\Delta\alpha$  для водных растворов формиата натрия отрицательна при некоторых концентрациях соли (при температурах 283,15, 288,15 и 298,15 K). Подобный ход зависимости авторы работы [15] связывают с преобладающим влиянием эффекта разрыва межмолекулярных связей в исходной структуре воды при введении в раствор соли. Дальнейшему повышению температуры соответствуют положительные значения  $\Delta\alpha$ , т.к.  $\alpha_0 > \alpha$ . Кроме этого, по мере возрастания молярной доли формиата натрия наблюдается тенденция к достижению предельного значения  $\Delta\alpha$ . Она проявляется при всех температурах.

Относительное возрастание коэффициента термического расширения в 5,14%-ном растворе формиата натрия с увеличением температуры от 283,15 K до 318,15 K составляет всего 1,1%, а в 39,79%-ном только около 1,7% (см. таблицу 8). В чистой воде в этом же диапазоне температур относительное возрастание коэффициента термического расширения составляет 107,5% (см. таблицу 9). Это связано с более



сложными процессами, протекающими в растворах. Если в чистой воде с увеличением температуры происходит только разрушение ажурной структуры воды (разрыв водородных связей), то при образовании раствора картина значительно усложняется. При образовании раствора идет разрыв водородных связей не только за счет усиления теплового движения, но и за счет процессов гидратации, одновременно появляются гидратированные ионы, взаимодействующие между собой и создающие новые структурные элементы в растворе.

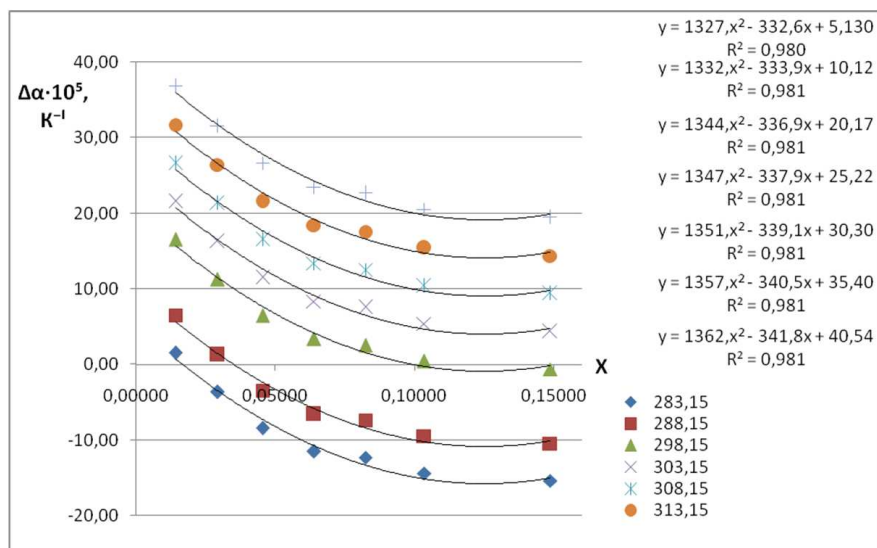


Рисунок 4. – Зависимость  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha$  от молярной доли формиата натрия в водном растворе

#### Выводы.

1. Исследована зависимость плотности водных растворов формиата натрия от температуры и концентрации.
2. На основании экспериментальных данных рассчитаны кажущиеся молярные объемы и гидратные числа формиата натрия, парциальные молярные объемы формиата натрия и воды, коэффициенты активности – меры отклонения свойства формиата натрия в реальном растворе по отношению к идеальному, коэффициенты термические расширения растворов.
3. Характер наблюдаемых зависимостей полученных характеристик от концентрации формиата натрия и температуры рассмотрен с позиции происходящих в растворе структурных изменений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пак Чжон Су. Закономерность в изменении объемных свойств растворов электролитов / Пак Чжон Су, И.Н. Максимова // Укр. хим. журн. – 1983. – Т. 49. – С. 508–511.
2. Носова, Т.А. Об использовании данных по плотности для суждения о структуре водных растворов электролитов / Т.А. Носова, О.Я. Самойлов // Журн. структур. химии. – 1961. – Т. 2, № 5. – С. 604.
3. Рейхардт, А.А. Зависимость между плотностью растворов электролитов и их молярной концентрацией / А.А. Рейхардт // Журн. физ. химии. – 1970. – Т. 44, № 7. – С. 437.
4. Dunn, L.A. Apparent molar volumes of electrolytes. Part 1 : Some 1–1, 1–2, 2–1, 3–1 electrolytes in an aqueous solution at 25 °C / L.A. Dunn / Faraday Soc. – 1966. – 62. – P. 2348–2354.
5. Dunn, L.A. Apparent molar volumes of electrolytes. Part 2 : 1–1 electrolyte in an aqueous solution at 25 °C. L.A. / L.A. Dunn / Faraday Soc. – 1968. – 64. – P. 1898–1903.
6. Dunn, L.A. The apparent molar volumes of electrolytes. Part 3 : Some electrolytes 1-1 and 2-1 in aqueous solution at 0, 5, 15, 35, 45, 55 and 65 °C / L.A. Dunn / Faraday Soc. – 1968. – 64. – P. 2951–2961.
7. Changes in Apparent Molar Water Volume and DKP Solubility Yield Insights on the Hofmeister Effect / Alexander Y. Payumo, R. Michael Huijon, Deauna D. Mansfield, Laurel M. Belk, Annie K. Bui, Anne E. Knight, Daryl K. Eggers\* // J. Phys. Chem., B. – 2011. – 115(49). – P. 14784–14788.
8. Электронный источник (2019): [http://www.plasma.com.ua/chemistry/chemistry/sodium\\_formate.html](http://www.plasma.com.ua/chemistry/chemistry/sodium_formate.html).
9. Blukhra, R.I. Solute-Solvent Interaction in Solutions of Sodium Formate in Water and Aqueous Ethyl Formate / R.I. Blukhra, P.C. Verma // J. Indian. Chem. Soc. – 1977. – v/LIV, № 12. – P. 1129–1135.
10. Новый справочник химика и технолога / под ред. акад. РАЕН, проф., д-ра хим. наук С.А. Симановой. – СПб. : Профессионал, 2006. – 838 с.
11. Volker, N. Partial Molar and Effective ionic radius of the  $\text{TcO}_4^-$  ion in aqueous solution / Neck Volker, Basil Kanellakopoulos // Radiochem. Acta. – 1987. – 42, № 3. – P. 135–137.

12. Королев, В.П. Объемные свойства и гидратные числа хлорида и нитрата аммония в растворе. Структурно-термодинамический анализ / В.П. Королев // Журн. структур. химии. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 493–499.
13. Ньюмен, Дж. Электрохимические системы : [пер. с англ.] / Дж. Ньюмен ; под ред М.Ж. Чизмаджева. – М. : Мир, 1977. – 464 с.
14. Крестов, Г.А. Термодинамика ионных процессов в растворах / Г.А. Крестов. – Л. : Химия, 1973. – С. 102–103.
15. Крунчак, Е.Г. Изучение плотности системы иодид натрия – изобутанол с помощью математического метода планирования эксперимента / Е.Г. Крунчак, Б.С. Крумгальз, Ю.И. Полесова // Тр. III конф. по аналитической химии неводных растворов и их физико-химическим свойствам. – Горький : ГПН, 1973. – С. 100–104.
16. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – Изд. десятое, испр. и доп. – СПб. : Иван Федоров, 2003. – С. 15.

Поступила 14.01.2020

## INVESTIGATION OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF BULK PROPERTIES OF AQUEOUS SOLUTIONS OF SODIUM FORMATE

*P. HALUSHKOV, E. MOLOTOK*

*The dependence of the density of aqueous solutions of sodium formate on the concentration and temperature is studied. Apparent molar volumes, partial molar volumes, and thermal coefficients of volumetric expansion of sodium formate solutions are calculated.*

**Keywords:** *density, solution, sodium formate, partial and apparent molar volumes, thermal coefficients of volumetric expansion of solutions.*

УДК665.777.4:665.637:614.7

## СНИЖЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОКСОВОЙ ПЫЛИ НА РАБОТНИКОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЫЛЕПОДАВЛЯЮЩЕ-ПРОТИВОСМЕРЗАЮЩЕГО СРЕДСТВА

*канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, В.А. ЛЯХОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты исследования по получению на основе продуктов вторичных процессов нефтепереработки средства против смерзания и прилипания для пылеподавления и снижения потерь от выдувания влажных сыпучих углеродсодержащих материалов, в частности нефтяного кокса, при их транспортировке в условиях отрицательных температур. Использование разработанного пылеподавляюще-противосмерзающего средства позволит снизить пылевое воздействие на работников установки замедленного коксования при получении нефтяного топливного кокса и улучшить его морозоустойчивость, что положительно скажется на решении проблемы транспортировки в условиях отрицательных температур на ОАО «Белорусский цементный завод» нефтяного топливного кокса производства ОАО «Нафтан», а также позволит расширить ассортимент товарной продукции, увеличить эффективность производства и снизить затраты на закупку импортного противосмерзающего средства.*

**Ключевые слова:** *нефтепереработка, нефтяной кокс, пыль, пылевой фактор, пылеподавляюще-противосмерзающее средство.*

**Введение.** Стратегическим объектом с экономической точки зрения для Республики Беларусь является установка замедленного коксования (УЗК), которая позволит увеличить на ОАО «Нафтан» выход топливных фракций и наладить выпуск новой продукции – нефтяного кокса, первую партию которого планируется получить 31 августа 2020 года.

Сегодня процесс замедленного коксования – один из наиболее бурно развивающихся и перспективных процессов глубокой переработки нефтяного сырья. Введение установки замедленного коксования в эксплуатацию на НПЗ приводит к увеличению основного показателя – глубины переработки нефти до 95%. Вместе с тем УЗК относится к опасным производственным объектам, следовательно, для обеспечения безопасного ведения технологического процесса необходимо строгое соблюдение требований промышленной и пожарной безопасности, охраны труда. Кроме того, изменяются условия труда персонала установки в связи с тем, что появляется дополнительный вредный производственный фактор – пылевой, обусловленный выделением в воздух рабочей зоны коксовой пыли, которая обладает способностью к тлению, самовозгоранию и самовоспламенению. Превышение предельно допустимых концентраций по пыли нефтяного кокса в воздухе рабочей зоны производственных помещений (ПДК р. з. составляет 5 мг/м<sup>3</sup>) может стать причиной развития профессиональных легочных заболеваний [1–5]. По степени воздействия на организм человека пыль нефтяного кокса относится к 4 классу опасности. Согласно ГОСТ 22898 температура тления при самовозгорании пыли с размером частиц 50...100 мкм достигает 205...235 °С, температура самовоспламенения – 535...625 °С. Пыль с размером частиц 50...160 мкм не взрывоопасна: нижний предел воспламенения аэрозвеси отсутствует до 500 г/м<sup>3</sup>.

Кроме того, высокая влажность нефтяного кокса создает трудности при обработке кокса на УЗК, приводя к низкой эффективности рассева на грохоте. Перевозка топливного нефтяного кокса, обладающего повышенной влажностью, сопровождается в осенний период интенсивным прилипанием, а в зимний – смерзанием груза и примерзанием к металлической поверхности думпкаров, гондол, хопперов, кузовов автосамосвалов. В результате этого до 50% горной массы остается невыгруженной, что вызывает необходимость в дополнительной очистке, при этом стоимость перевозки увеличивается до 20%. Для предупреждения пылеуноса, прилипания, смерзания, примерзания горных пород, имеющих повышенную влажность, применяются различные средства. Наиболее широкое промышленное применение за последние годы получили профилактические средства нефтяного происхождения – Ниогрин и Универсин [6–8].

В настоящее время для нефтеперерабатывающей отрасли актуальной является задача борьбы с пылеобразованием, потерями от выдувания, прилипанием, смерзанием и примерзанием к рабочим металлическим поверхностям автомобильных и железнодорожных транспортных средств при транспортировке в условиях отрицательных температур нефтяного топливного кокса, что и определило цель настоящего исследования.

**Методы исследований.** Выполнено компаундирование загущающей добавкой с растворителем, произведен подбор и определено оптимальное соотношение исходных сырьевых компонентов для получения пылеподавляюще-противосмерзающего средства с комплексом требуемых свойств.

Пылеподавляюще-противосмерзающее средство получали в цилиндрическом смесителе с механическим перемешивающим устройством и регулируемым подогревом всей наружной поверхности. Загущающую добавку в количестве 3...5% масс. нагревали в цилиндрическом металлическом смесителе до  $(85\pm 5)$  °С, к нему добавляли 95...97% масс. растворителя и перемешивали смесь в течение 10 мин при  $(85\pm 5)$  °С до получения однородной массы, затем полученную смесь подвергали изотермической выдержке в течение 60 мин при  $(85\pm 5)$  °С.

В качестве загущающих добавок профилактических средств использовали:

– мазут с установки АВТ-6 ОАО «Нафтан» с плотностью при 20 °С по ГОСТ 3900, равной  $939 \text{ г/см}^3$ , температурой вспышки, определяемой в открытом тигле по ГОСТ 4333, составляющей 173 °С;

– гудрон с установки ВТ-1 ОАО «Нафтан» с плотностью при 20 °С по ГОСТ 3900, равной  $1002 \text{ г/см}^3$ , температурой вспышки, определяемой в открытом тигле по ГОСТ 4333, составляющей 275 °С.

В качестве растворителей в профилактических средствах использовали керосино-газойлевые фракции вторичных процессов:

– керосино-газойлевую фракцию процесса висбрекинга с установки «Висбрекинг-Термокрекинг» ОАО «Нафтан» с пределами кипения 195...245 °С;

– побочную фракцию ароматических углеводородов  $C_{10+}$  с установки «Псевдокумол» ОАО «Нафтан» с пределами кипения 180...330 °С.

Характеристики используемых керосино-газойлевых фракций вторичных процессов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-химическая характеристика компонентов растворителя пылеподавляюще-противосмерзающего профилактического средства

Показатель	Фракция ароматических углеводородов $C_{10+}$ с установки «Псевдокумол»	Керосино-газойлевая фракция с установки «Висбрекинг-Термокрекинг»
Плотность при 20 °С по ГОСТ 3900, $\text{г/см}^3$	0,902	0,819
Вязкость условная по ГОСТ 6258, ВУ при 50 °С	1,096	1,092
Температура вспышки ГОСТ 6356, °С	62	69
Температура застывания по ГОСТ 20287, °С	ниже минус 65	минус 54
Содержание механических примесей по ГОСТ 6370, % масс.	отс.	отс.
Фракционный состав по ГОСТ 2177:		
начало кипения	180	195
5%	182	200
10%	182	203
20%	184	205
30%	186	207
40%	189	208
50%	193	212
60%	196	216
70%	207	221
80%	258	228
90%	299	236
93%	316	240
95%	328	243
конец кипения	330	245

Полученные пылеподавляюще-противосмерзающие средства исследовали стандартными методами с целью установления температуры застывания (ГОСТ 20287-74), температуры вспышки в закрытом тигле (ГОСТ 6356), условной вязкости при 50 °С (ГОСТ 6258), плотности 20 °С (ГОСТ 3900), массового содержания механических примесей и воды (ГОСТ 6370 и ГОСТ 2477 соответственно).

**Результаты и их обсуждение.** В таблице 2 приведено сравнение технико-экономических показателей трех предлагаемых образцов пылеподавляюще-противосмерзающих средств с промышленными аналогами:

- образец 1: дизельное топливо Висбрекинга с 5% масс. мазута с установки АВТ-6;
- образец 2: дизельное топливо Висбрекинга с 3% масс. гудрона с установки ВТ-1;
- образец 3: фракция суммарной ароматики C<sub>10+</sub> 5% масс. мазута с установки АВТ-6.

Таблица 2. – Физико-химические свойства образцов предлагаемых пылеподавляюще-противосмерзающих средств в сравнении с промышленными аналогами

Показатели	Ниогрин ПС-35С ТУ 0258-002- 38507925-2012	Универсин-С ПС ТУ 38.1011142-88	Серерин-2 ТУ 38.101863-81	Предлагаемые профилактические средства		
				образец 1	образец 2	образец 3
Условная вязкость при 50 °С, ВУ, ГОСТ 6258, в пределах	1,0...3,0	1,1...3,5	1,1...1,5	1,12	1,11	1,09
Температура застывания по ГОСТ 20287, °С, не выше	минус 35	минус 40	минус 50	ниже минус 65	ниже минус 65	ниже минус 70
Температура вспышки по ГОСТ 6356, °С, не ниже	40	80	80	70	70	62
Массовая доля воды по ГОСТ 2477, в %, не более	2,0	0,5	0,5	0,01	0,01	0,01
Массовая доля механических примесей по ГОСТ 6370, в %, не более	1,0	0,3	0,2	следы	следы	следы
Испытание на медной пластинке по ГОСТ 6321	выдерживает	–	–	выдерживает		
Цвет, визуально	от светло-коричневого до черного					
Стоимость, долл./т	180...200	180...200	210...1100	55	54	498

Полученные пылеподавляюще-противосмерзающие средства представляют собой легкоподвижную маслянистую жидкость темно-коричневого цвета на основе растворителя и загущающей добавки нефтяного происхождения. При небольшом содержании загущающей добавки обладают высокими низкотемпературными свойствами, что позволяет использовать их в суровых климатических условиях. При этом 3...5% масс. является оптимальной концентрацией загущающей добавки (гудрона либо мазута) для достижения максимального депрессорного эффекта в керосино-газойлевых фракциях.

Анализ коррозионного воздействия на металлы (Сталь 10, алюминий, медь) по ГОСТ 9.080 показал, что все образцы выдерживают испытания.

Моделирование процесса примерзания и прилипания к поверхности полувагонов проводилось в лабораторных условиях при искусственном обводнении (содержание влаги 10%) нефтяного кокса либо каменного угля в морозильных камерах при температуре –30 °С в течение 48 ч. Эксперименты проводили в специальных металлических макетах железнодорожных полувагонов (материал – Сталь 20), моделирующих железнодорожные вагоны, используемые для перевозки угля, уменьшенные в 1225 раз [9]. Обработка внутренней поверхности полувагона производилась при помощи пульверизатора. Объем нефтяного кокса либо угля обрабатывался распылением реагента через форсунку. На практике для обработки стенок одного полувагона расход средств составил 10 л. Для сравнительных испытаний принят расход 8 мл на одну модель полувагона, согласно кратности масштабирования данного объекта. Выгрузка нефтяного кокса либо угля после выдержки контейнеров в морозильной камере при температуре –30 °С в течение 48 ч производилась после механического воздействия на боковую стенку модели полувагона ударами гири массой 1 кг, привязанной на шнуре длиной 35 см и углом падения 45° с последующим переворачиванием. После каждого удара и переворачивания производилась визуальная оценка объема выгруженного угля в процентном соотношении.

Результаты моделирования процесса примерзания и прилипания к поверхности полувагонов показали, что все образцы позволяют снизить адгезию (примерзаемость) нефтяного кокса либо угля к металлической поверхности, значительно уменьшить смерзаемость нефтяного кокса либо угля и облегчить их выгрузку из контейнеров-макетов. Составы показывают достаточные адгезионные свойства по отношению к пыли, что позволяет сократить потери от выдувания влажных сыпучих углеродсодержащих материалов при их транспортировке и снизить воздействие пылевого фактора на персонал.

При нанесении жидкости на внутренние поверхности кузовов думпкаров, полувагонов, вагонов и автосамосвалов, а также на внутренние поверхности ковшей экскаваторов, грейдеров и другой карьерной техники происходит образование на металлической поверхности прочного углеводородного слоя, который не допускает прямого контакта между кусками насыпного материала и металлом, в результате чего прочность прилипания и примерзания углеродсодержащей массы снижается. При обработке массы насыпного материала на его поверхности также образуется тонкая пленка, предотвращающая смерзание кусков материала в единый монолит.

Распыление пылеподавляюще-противосмерзающего средства при транспортировке нефтяного кокса рекомендуется осуществлять одновременно, непосредственно на внутреннюю металлическую поверхность транспортных средств и на движущийся по конвейеру кокс с общим расходом 0,8...3% масс. от массы нефтяного кокса [10].

**Заключение.** Использование керосино-газойлевой фракции процесса висбрекинга остаточного нефтяного сырья с пределами кипения 195...245 °С либо побочного продукта с установки «Псевдокумол» фракции ароматических углеводородов C<sub>10+</sub> с пределами кипения 180...330 °С в оптимальных концентрациях даст возможность расширить сырьевую базу для получения профилактических средств, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющими использовать средства для предотвращения смерзания, прилипания и для пылеподавления сыпучих углеродсодержащих материалов, в т.ч. нефтяного кокса и угля, в условиях их транспорта при низких температурах, а также расширить сферу использования побочных и сопутствующих продуктов нефтепереработки. Промышленная реализация предлагаемого средства для предотвращения смерзания, прилипания и пылеподавления сыпучих углеродсодержащих материалов позволит сократить затраты на их транспортировку и выгрузку и снизить воздействие пылевого фактора на персонал.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхович, В.А. Противосмерзающее средство из отходов нефтехимии для транспортировки топливного кокса / В.А. Ляхович, В.А. Емельянова, Ю.А. Булавка // Нефть и газ-2018 : сб. тез. 72-й междунар. молодеж. науч. конф., Москва, 23–26 апр. 2018 г. – Т. 2. – М. : Издат. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. – С. 366.
2. Ляхович, В.А. Снижение воздействия пылевого фактора на работников при получении и транспортировке нефтяного кокса / В.А. Ляхович, Ю.А. Булавка // Безопасность-2019 : материалы докл. XXIV Всерос. студ. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Проблемы экологической и промышленной безопасности современного мира», Иркутск, 16–19 апр. 2019 г. – Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2019. – С. 129–131.
3. Ляхович, В.А. Пылеподавляющий и противосмерзающий состав для кокса из продуктов вторичных процессов переработки нефтяного сырья / В.А. Ляхович, Ю.А. Булавка // Наука. Технология. Производство-2019 : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Респ. Башкортостан / редкол.: Н.Г. Евдокимова [и др.]. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2019. – С. 59–61.
4. Liakhovich, V. Method to reduce freezing and improve dust suppression when receiving and transporting petcoke / V. Liakhovich, Y. Bulauka // Topical issues of rational use of natural resources : Scientific Conference of XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers, St. Petersburg, May 13–17, 2019. – St. Petersburg, 2019. – P. 24.
5. Ляхович, В.А. Способ снижения смерзания и улучшения пылеподавления при получении и транспортировке нефтяного кокса / В.А. Ляхович, Ю.А. Булавка // Нефть и газ-2019 : сб. тез. докл. 73-й Междунар. молодеж. науч. конф., Москва, 22–25 апр. 2019 г. – Т. 5. – М. : Издат. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019. – С. 468–469.
6. Ляхович, В.А. Способы подавления пылеобразования при транспортировке углеродсодержащих материалов / В.А. Ляхович, Ю.А. Булавка // Промышленная безопасность и охрана труда: практика, обучение, инновации : сб. материалов междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Минск : УГЗ, 2019. – С. 26–29.
7. Liakhovich, V. Method to reduce freezing and improve dust suppression when receiving and transporting petcoke / V. Liakhovich, Y. Bulauka // European and national dimension in research. Technology = Европейский и национальный контексты в научных исследованиях : Electronic collected materials of XI Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 23–24, 2019 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2019. – P. 104–105.
8. Liakhovich, V. Receiving an antifreezing agent for transporting coke by rail / V. Liakhovich, V. Yemelyanova, Y. Bulauka // European and national dimension in research. technology = Европейский и национальный контексты в научных исследованиях : Electronic collected materials of X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 10–11, 2018 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2018. – P. 153–155.

9. Профилактическая смазка для предотвращения смерзания сыпучих веществ : пат. RU 2 582 129 С1 : МПК С09К 3/18(2006.01) / Е.И. Кагакин, А.Р. Богомолов, А.А. Каськов, А.И. Горбунков ; дата публ. 20.04.2016.
10. Походенко, Н.Т. Получение и обработка нефтяного кокса / Н.Т. Походенко, Б.И. Брондз. – М. : Химия, 1986. – С. 289–293.

Поступила 12.12.2019

## REDUCING THE INFLUENCE OF COKE DUST ON WORKERS BY USING DUST-SUPPRESSING-ANTI-FREEZING MEANS

*Y. BULAUKA, V. LIAKHOVICH*

*This article presents the results of studies on the production of anti-freezing and adhesion agents based on products of secondary oil refining processes for dust suppression and reduction of losses from the blowing out of wet bulk carbon-containing materials, in particular petroleum coke, during their transportation at low temperatures. The use of the developed dust suppressing-antifreeze agent will reduce the dust exposure on the employees of the delayed coking unit during the production of fuel grade petroleum coke and improve its freeze resistance. This will have a positive impact on the solution of the problem of transportation of fuel grade petroleum coke produced by OJSC "Naftan" to OJSC "Belarusian Cement Plant" at subzero temperatures, and will also allow expanding the range of marketable products, increasing production efficiency and reducing expenditures on purchasing of imported antifreeze*

**Keywords:** *oil refining, petroleum coke, dust, dust factor, dust-suppressing and anti-freezing agent.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Функциональное проектирование кинематико-компоновочных схем универсальных металлорежущих станков .....	2
<i>Жорник В.И.</i> Структурно-фазовое состояние и свойства вольфрам-медь-кобальтового сплава, модифицированного наноразмерной углеродной добавкой .....	13
<i>Пилипенко С.В.</i> Применение методов морфологического анализа для принятия оптимальных технических решений .....	23
<i>Попок Н.Н., Анисимов В.С.</i> Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ .....	28
<i>Боровский Д.Н., Гарабазжу А.А., Петров О.А., Семененко Д.В.</i> Тонкое измельчение стеклобоя в планетарной мельнице .....	35
<i>Войтехович П.Е.</i> Измельчители дезинтегрированного типа с регулируемой тониной помола .....	39

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Брич М.А., Горбачёв Н.М., Козначеев И.А., Макаренко Д.С., Грозберг Ю.Г., Адамович А.Л.</i> Условия разрушения влажного коллоидного капиллярно-пористого материала при термомеханической обработке сбросом давления .....	45
<i>Смирнов А.А., Смирнова Т.В., Дреев А.Н., Дудан А.В.</i> Оптимизация технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса .....	50
<i>Азаров С.М., Дробыш А.А., Балыдко Д.Н., Леоник Д.Л.</i> Исследование процесса очистки технической воды многослойными пористыми материалами .....	62

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Спириденко Л.М., Колесникович В.В.</i> Оценка факторов, влияющих на аварийность технологических трубопроводов при установке шаровых кранов .....	68
<i>Галушков П.А., Молоток Е.В.</i> Исследование концентрационной и температурной зависимости объемных свойств водных растворов формиата натрия .....	75
<i>Булавка Ю.А., Ляхович В.А.</i> Снижение воздействия коксовой пыли на работников путем использования пылеподавляюще-противосмерзающего средства .....	83