

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

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



ВЕСНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі 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) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: *В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.*
Редактор *Т.А. Дарьянова.*

Подписано к печати 23.09.2020. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 17,94. Тираж 100 экз. Заказ 462.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

**МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СОВРЕМЕННОЙ ПАРАДИГМЫ ПОЗНАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ
В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ ИЗОБРЕТЕНИЙ****канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ**
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается возможность использования современной парадигмы познания металлорежущих станков в научно-технической экспертизе изобретений в станковедении. Целесообразность использования названной парадигмы подтверждается высоким уровнем кумулятивности научно-технической экспертизы изобретений. Наиболее рационально использование данной парадигмы при патентной защите металлорежущих станков при представлении их в форме кинематико-компоновочных схем. На конкретных примерах зубообрабатывающих станков, признанных изобретениями и защищенных патентами, рассматривается методика составления описания и формулы изобретения в терминах современной парадигмы познания.

Ключевые слова: научно-техническая экспертиза изобретений, кумулятивность, парадигма познания станочного оборудования, терминология парадигмы, кинематическая структура, методика составления описания и формулы изобретения.

Введение. Научно-техническая экспертиза изобретений (НТЭ) обладает высокой кумулятивностью, т.е. способностью «...полностью или частично, но без изменений включать в свой состав содержание других научных дисциплин» [1]. Это свойство НТЭ подтверждается также нормативным актом [2], обязывающим при изложении всех разделов описания заявляемого изобретения «...использовать термины, общепринятые в данной области техники». В настоящее время в НТЭ при описании изобретений к патентам, защищающим металлорежущие станки как целостные объекты реальной действительности, доминирует парадигма познания металлорежущих станков, основанная на научном направлении, называемом кинематикой металлорежущих станков. Ее основоположником является профессор Г.М. Головин. Используя принцип возможных перемещений, известный в теоретической механике как принцип Даламбера, он разработал единую теорию настройки металлорежущих станков [3]. Эта теория рассматривает кинематическую структуру станка как совокупность составляющих ее кинематических цепей, связывающих исполнительные органы станка между собой и с источниками механической энергии и определяемых из возможности составления уравнения кинематического баланса на основе единой формулы настройки.

Наряду с выводом формул настройки эта теория до настоящего времени используется в НТЭ для объяснения физической сущности работы металлорежущих станков. Определенные сомнения в корректности такого использования теории настройки высказывал ее автор. Описывая работу станка для точения резьбы (червяка) чашечным резцом типа долбяка, он отмечает [3]: «Достоинством внимания здесь оказывается и то обстоятельство, что при выполнении резьбовых работ шаг (nt) изготавливаемой резьбы оказывается получающимся независимо от подачи (s), при которой производится обработка. Это парадоксальное явление может быть объяснено тем обстоятельством, что возникающий при этом процесс распадается на составляющие его части, одной из которых является копирование инструментом и заготовкой в каждый отдельный момент, независимо от участия в процессе движения подачи, работы червячной передачи, а второй – процесс резания, обеспечиваемый подачей независимо от того, участвует ли инструмент и заготовка в копировании работы червячной передачи или же нет». Данное парадоксальное явление, по существу, является противоречием между кинематической структурой технической системы (металлорежущего станка), рассматриваемой на основе принципа возможных перемещений, и функцией (принципом работы) этой системы, основанной на ином законе теоретической механики. Это противоречие разрешил профессор А.А. Федотенок, разработавший на основе закона разветвления энергии движения в механических цепях современную теорию кинематической структуры металлорежущих станков [4]. По этой теории кинематика станка – это объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит конкретное элементарное (вращательное или поступательное) или сложное, состоящее из элементарных, формообразующее или вспомогательное движение, характеризующееся вполне определенными настраиваемыми параметрами. В общем случае таких параметров пять: траектория, направление,

Формула изобретения в символах современной парадигмы познания. Станок для долбления зубчатых колес, содержащий кинематическую группу поступательно-возвратного движения смонтированной в суппорте гильзы, несущей шпиндель долбяка, кинематически связанный посредством внутренней связи группы обката с делительным столом, кинематическую группу, включающую кулачковый механизм качательного движения суппорта относительно оси червяка делительной передачи шпинделя, при этом профиль кулачка кулачкового механизма выполнен в виде двух дуг, разделенных переходными кривыми, одна из дуг соответствует поступательному движению гильзы, а другая – ее возвратному движению, **отличающийся** тем, что обе дуги профиля кулачка выполнены по архимедовой спирали, конечный радиус дуги, соответствующей поступательному движению гильзы, больше ее начального радиуса, а начальный радиус дуги, соответствующий возвратному движению гильзы, больше ее конечного радиуса, причем разность радиусов для обеих дуг одинакова.

Описание изобретения в символах современной парадигмы познания. В суппорте 3 смонтирована с возможностью поступательно-возвратного движения гильза 4, в которой установлен шпиндель 1, несущий долбяк. Суппорт закреплен на стойке 20 с обеспечением качательного движения относительно оси червяка делительной передачи 10 шпинделя 1. Качательное движение шпинделя осуществляется кулачковым механизмом, включающим кулачок 14, толкатель 13, соединенный шарниром 12 с суппортом 3, и пружину, обеспечивающую силовое замыкание.

Кинематическая структура станка включает сложные формообразующие группы $\Phi_v(P_1P_2)$, $\Phi_s(B_6B_5)$ и простую группу врезания $Vp(P_4)$.

Группа $\Phi_v(P_1P_2)$ воспроизводит образующую зубчатого колеса – линию зуба по длине. Ее внутренняя связь

$$P_1 \rightarrow \text{гильза } 4 \rightarrow \text{кулисный механизм } 2 \rightarrow \text{приводной вал } 18 \rightarrow \text{передача } 16 \rightarrow \text{передача } 15 \rightarrow \\ \rightarrow \text{кулачок } 14 \text{ (орган настройки } i_y) \rightarrow \text{толкатель } 13 \rightarrow \text{шарнир } 12 \rightarrow \text{суппорт } 3 \rightarrow P_2;$$

внешняя связь

$$M_1 \rightarrow \text{передача } 19 \rightarrow \text{передача } 17 \rightarrow \text{приводной вал } 18 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается: на траекторию – кулачком 14 (жесткий программноноситель); на скорость воспроизведения линии зуба – изменением круговой частоты электродвигателя M_1 ; на путь и исходную точку – изменением плеч рычагов кулисного механизма 2.

Группа $\Phi_s(B_6B_5)$ воспроизводит направляющую зубчатого колеса – профиль зубьев. Ее внутренняя связь, имитирующая зубчатое зацепление,

$$B_6 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \rightarrow \text{передача } 10 \rightarrow \text{передача } 11 \rightarrow i_x \rightarrow \\ \rightarrow \text{делительный стол } 5 \rightarrow B_5;$$

внешняя связь

$$M_2 \rightarrow i_s \rightarrow \text{передача } 11 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается: на траекторию – органом настройки i_x (гитара сменных зубчатых колес); на скорость воспроизведения профиля зубьев – органом настройки i_s ; на направление – совмещением реверсивного механизма с органом настройки i_x .

Группа $Vp(P_4)$ обеспечивает врезание долбяка на высоту зуба. Ее внутренняя связь

$$\text{направляющие станины} \rightarrow \text{продольный стол, несущий делительный стол } 6;$$

внешняя связь

$$\text{гидроцилиндр } 9 \rightarrow \text{продольный стол (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается: на скорость – регулируемым дросселем гидравлической схемы; на исходную точку и путь – упорами.

В структуре станка нет традиционной для зубодолбежных станков группы $Vc(P_3)$ отвода долбяка при его возвратном ходе в движении P_1 . Ее функцию (движение P_3) выполняет группа $\Phi_v(P_1P_2)$.

Настройка параметров исполнительных движений. Кулачок 14 кулачкового механизма имеет форму диска с отверстием для его установки на станке. Рабочий профиль кулачка выполнен в виде двух дуг 1 и 3, разделенных переходными кривыми 2 и 4. Дуги 1 и 3 выполнены по архимедовой спирали. При указанном направлении вращения кулачка дуга 1 соответствует движению резания в поступательно-возвратном движении P_1 долбяка, а дуга 3 – его возвратному движению. При этом конечный радиус R_2 дуги 1 больше ее начального радиуса R_1 , а конечный радиус R_4 дуги 3 меньше ее начального радиуса R_3 . Разности радиусов для обеих дуг одинаковы и равны пути l дополнительного движения P_2 долбяка. То есть $(R_2 - R_1) = (R_3 - R_4) = l$.

Путь дополнительного движения Π_2 определяется по выражению [6, п. 1]

$$l = L \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где l – путь дополнительного движения Π_2 , мм;
 L – путь поступательно-возвратного движения Π_1 , мм;
 φ – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

Таким образом, разности радиусов $(R_2 - R_1)$ и $(R_3 - R_4)$ равны пути дополнительного радиального равномерного перемещения долбяка в движении Π_2 . Переходные кривые 2 и 4 выполнены в виде дуг окружности, радиус которой соответствует радиусу ролика толкателя кулачкового механизма.

Разности радиусов $(R_1 - R_4)$ и $(R_2 - R_3)$ равны пути отвода долбяка в движении Π_3 . Следовательно, при приведенном выполнении кулачка его профиль как жесткий, физический программноситель несет информацию о двух элементарных движениях Π_2 и Π_3 , которые в соответствии со способом зубодолбления [7] должны осуществляться синхронно и синфазно с движением Π_1 . Причем движение Π_2 совместно с движением Π_1 образует сложное формообразующее движение $\Phi_1(\Pi_1\Pi_2)$, воспроизводящее линию зуба нарезаемого колеса по делительному конусу.

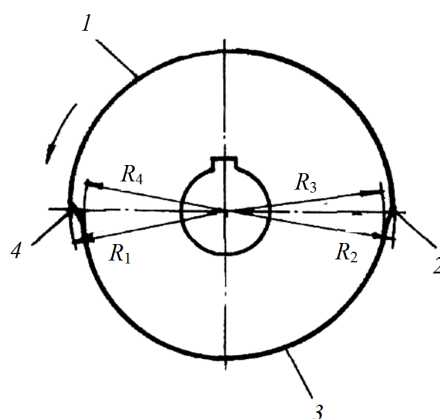


Рисунок 2. – Орган настройки траектории движения $\Phi_1(\Pi_1\Pi_2)$

Орган настройки i_x . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы $\Phi_3(B_6B_5)$. Расчетные перемещения (РП) моделируют зубчатое зацепление:

$$1 \text{ об. долбяка } (B_1) \rightarrow \frac{z_u}{z \text{ об. заготовки колеса } (B_2)},$$

где z_u – число зубьев долбяка;
 z – число зубьев нарезаемого колеса.
Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ)

$$\frac{z_u}{z} = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.
Откуда формула настройки (ФН)

$$i_x = \frac{z_u}{c_1 \cdot z}.$$

Орган настройки i_s . Расчетная цепь связывает электродвигатель M_2 со шпинделем I долбяка. Следовательно, РП

$$n_M \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } M_2 \rightarrow \frac{s}{\pi \cdot t \cdot z_u} \text{ мм/мин.}$$

Тогда УКЦ

$$\frac{s}{\pi \cdot t \cdot z_u} = c_2 \cdot n_M \cdot i_s.$$

Откуда ФН

$$i_s = \frac{s}{c_2 \cdot n_M \cdot \pi \cdot m \cdot z_u},$$

где s – круговая подача долбяка, мм/мин;

m – модуль нарезаемых зубьев, мм;

c_2 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Станок работает следующим образом. Электродвигатель M_1 по внешней связи группы $\Phi_1(\Pi_1\Pi_2)$ через звено соединения связей – приводной вал – сообщает движение 18 во внутреннюю связь группы. В итоге посредством кулисного механизма 2 долбяк получает поступательно-возвратное движение Π_1 и синхронно с ним посредством кулачкового механизма поступательно-возвратное радиальное движение, представляющее собой геометрическую сумму дополнительного равномерного движения Π_2 и поступательно-возвратного движения Π_3 подвода–отвода долбяка на участках верхнего и нижнего перебегов. В итоге долбяк совершает поступательно-возвратное движение по траектории в виде прямой, наклоненной к оси заготовки на угол, равный углу наклона зубьев колеса. Затем при включении электродвигателя M_2 по внешней связи группы $\Phi_2(B_6B_5)$ через звено соединения связей долбяку и делительному столу с заготовкой сообщается движение обката со скоростью круговой подачи, состоящее из согласованных вращений B_5 делительного стола и B_6 долбяка. Движение обката обеспечивает воспроизведение профиля зубьев колеса. Одновременно на этапе врезания на высоту зубьев делительному столу сообщается движение Π_4 посредством гидроцилиндра 9. По окончании этапа врезания в течение полного оборота делительного стола выполняется профилирование цилиндрического зубчатого колеса с наклонными зубьями.

При выполнении кулачкового механизма со сменным кулачком на станке можно обрабатывать цилиндрические зубчатые колеса с различными углами наклона зубьев при соответствующем профилировании сменных кулачков. В кулачковом механизме можно использовать также кулачок, у которого дуги 1 и 3 рабочего профиля имеют иную форму. Это позволяет нарезать зубчатые колеса с бочкообразными зубьями. А при использовании кулачка, у которого рабочие профили выполнены в виде дуг окружностей, можно нарезать традиционные зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. В этом случае сложная формообразующая группа $\Phi_1(\Pi_1\Pi_2)$ преобразуется в простую $\Phi_1(\Pi_1)$. Одновременно образуется группа отвода–подвода (радиального «отскока») долбяка $Bc(\Pi_3)$, обеспечивающая отвод долбяка при его возвратном ходе в движении Π_1 .

Данное техническое решение по сравнению с прототипами имеет более широкие технические возможности за счет обработки зубчатых колес с наклонными зубьями. Достигается это тем, что благодаря дополнительному равномерному движению долбяка синхронно с его движением подвода–отвода на участках перебега в движении воспроизведения линии зубьев колеса последнее, оставаясь в плоскости оси заготовки, образует с ней угол, по которому определяется путь дополнительного движения долбяка. На рисунке 3 приведена структурная схема зубофрезерного станка для обработки цилиндрических зубчатых колес по патенту [8].

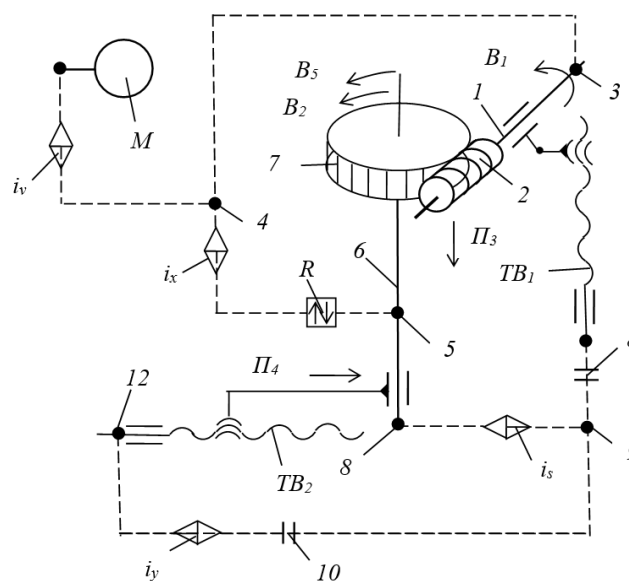


Рисунок 3. – Структурная схема зубофрезерного станка для обработки цилиндрических колес

Формула изобретения по патенту. Станок для нарезания цилиндрических зубчатых колес, включающий инструментальный шпиндель с закрепленной в нем червячной фрезой, кинематически связанной цепью обката с делительным столом, несущим зубчатое колесо, при этом инструментальный шпиндель установлен с возможностью продольного перемещения вдоль оси делительного стола от тягового механизма продольного перемещения, кинематически связанного цепью подачи с делительным столом, и радиального перемещения перпендикулярно оси делительного стола от тягового механизма радиального перемещения, **отличающийся** тем, что тяговые механизмы радиального и продольного перемещений инструментального шпинделя соединены между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки.

Формула изобретения в символах современной парадигмы познания. Станок для нарезания цилиндрических зубчатых колес, содержащий формообразующие группы обката, воспроизводящей профиль зубьев нарезаемых колес, и продольной подачи, воспроизводящей линию зубьев, причем обе формообразующие группы соединены общим электродвигателем, группа обката внутренней связью кинематически соединяет инструментальный шпиндель червячной фрезы с делительным столом, несущим заготовку нарезаемого колеса, при этом инструментальный шпиндель установлен с возможностью продольного перемещения вдоль оси делительного стола от тягового механизма продольного перемещения, кинематически связанного цепью подачи с делительным столом, и радиального перемещения перпендикулярно оси делительного стола от тягового механизма радиального перемещения, **отличающийся** тем, что тяговые механизмы радиального и продольного перемещений инструментального шпинделя соединены между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки.

Описание изобретения в символах современной парадигмы познания. Кинематическая структура станка с механическими связями содержит сложные (двухэлементарные) формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3P_4)$, связанные между собой общим электродвигателем.

Группа скорости резания $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит образующую (профиль зубьев). Ее внутренняя связь

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow R \rightarrow \text{делительный стол } 5 \rightarrow B_2;$$

внешняя связь

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 3 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается: на траекторию и скорость воспроизведения образующей – органами настройки i_x и i_v соответственно; на направление – реверсом R .

Группа подачи $\Phi_s(P_3P_4)$ воспроизводит направляющую (делительную линию зуба на конусе). Ее внутренняя связь

$$P_3 \rightarrow \text{суппорт фрезы} \rightarrow \text{тяговый вал } TB_1 \rightarrow \text{муфта } 8 \rightarrow 9 \rightarrow \text{муфта } 10 \rightarrow i_y \rightarrow \text{тяговый вал } TB_2 \rightarrow P_4;$$

внешняя связь

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow R \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow i_s \rightarrow 9 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается: на траекторию и скорость воспроизведения направляющей – органами настройки i_y и i_s соответственно; на путь и исходное положение – по упорам системы управления.

В станках с механическими связями органы настройки на траекторию обоих формообразующих движений и органы настройки на скорости резания и подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес.

Выведем формулы настройки (ФН) для органов настройки i_x, i_v, i_y, i_s .

Орган настройки i_x . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы $\Phi_v(B_1B_2)$. Расчетные перемещения (РП) моделируют червячное зацепление:

$$1 \text{ об. фрезы } (B_1) \rightarrow \frac{k}{z \text{ об. заготовки колеса } (B_2)},$$

где k – число заходов червячной фрезы;

z – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ)

$$\frac{k}{z} = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_x = \frac{k}{c_1 \cdot z}.$$

Орган настройки i_v . Расчетная цепь связывает электродвигатель M со шпинделем фрезы (B_1). Следовательно, РП

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

Тогда УКЦ

$$n_\phi = n_M \cdot c_2 \cdot i_v.$$

Откуда ФН

$$i_v = \frac{n_\phi}{c_2 n_M},$$

где c_2 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки i_y . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы $\Phi_s(P_3P_4)$. Следовательно, РП

$$L \text{ мм перемещения суппорта } (P_3) \rightarrow l \text{ мм перемещения суппорта } (P_4),$$

где $l = L \cdot \operatorname{tg} \varphi$; l – путь дополнительного движения P_4 , мм;

L – путь движения P_3 , мм;

φ – угол наклона зубьев заготовки обрабатываемого колеса, град [7, п. 1].

Тогда УКЦ

$$l = L \cdot c_3 \cdot i_y,$$

где c_3 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН

$$i_y = \frac{l}{c_3 \cdot L}.$$

Орган настройки i_s . Расчетная цепь связывает суппорт фрезы с делительным столом обрабатываемой заготовки. Следовательно, РП

$$1 \text{ об. заготовки} \rightarrow s_n \text{ перемещения фрезы } (P_3).$$

Тогда УКЦ

$$s_n = 1 \cdot c_4 \cdot i_s \cdot t_{TB},$$

где c_4 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

t_{TB} – шаг тягового вала I_2 .

Откуда ФН

$$i_s = \frac{s_n}{c_4 \cdot t_{TB}}.$$

Станок работает следующим образом. По циклу обработки после установки заготовки на делительном столе включается электродвигатель M . Движение от электродвигателя по внешней связи группы $\Phi_v(B_1B_2)$ через звено соединения связей 4 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель фрезы 2 получает вращательное движение B_1 , а шпиндель 6 делительного стола, несущего заготовку 7 , – вращательное движение B_2 , согласованное с движением B_1 . Согласованные движения B_1 и B_2 воспроизводят профиль зубчатого венца со скоростью, заданной органом настройки i_v . Затем после включения муфт 8 и 10 движение от электродвигателя M по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 9 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге суппорт фрезы получает два согласованных между собой движения – продольное P_3 и радиальное P_4 – со скоростью, заданной органом настройки i_s . В результате профиль каждого зуба будет воспроизводиться по линии зуба, представляющей собой результирующую траекторию движений P_3 и P_4 , наклоненной к оси заготовки на заданный при настройке угол, т.е. по делительному конусу.

Структурная схема станка может также настраиваться для обработки винтовых (косозубых) цилиндрических колес с наклонными зубьями. Для этого формообразующее движение скорости резания

$\Phi_v(B_1B_2)$ преобразуется к виду $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$, где B_5 – дополнительный поворот заготовки для получения правой или левой винтовой линии зуба. При этом формообразующее движение подачи $\Phi_s(P_3P_4)$ остается неизменным, но становится математически связанным с движением B_5 и, следовательно, с формообразующим движением $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$. В этом случае при алгебраическом сложении движений ($B_2 \pm B_5$) на делительном столе изменяются РП для органа настройки i_x .

При обработке косозубого цилиндрического колеса за один оборот заготовки (движение B_2) червячная фреза совершает $\frac{k}{z}$ оборотов (движение B_1) и перемещается на величину s мм (движение P_3) по направляющей цилиндра. Для получения винтовой линии на обрабатываемом цилиндрическом зубчатом колесе при перемещении фрезы на величину s заготовка должна дополнительно повернуться на $\frac{s}{T}$ оборота (движение B_5), что соответствует дополнительному повороту фрезы на величину $\pm \left(\frac{k}{z} \right) \cdot \left(\frac{s}{T} \right)$.

Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$, преобразуются к виду

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2 \pm B_5) \rightarrow \frac{k}{z \left(1 \pm \frac{s}{T} \right)} \text{ оборота червячной фрезы } (B_1).$$

Тогда УКЦ

$$\frac{k}{z \left(1 \pm \frac{s}{T} \right)} = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где T – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев.

Откуда ФН

$$i_x = \frac{c_1 \cdot k}{z \left(1 \pm \frac{s}{T} \right)}.$$

На станке можно обрабатывать также традиционные цилиндрические зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого достаточно посредством муфты 10 отключить тяговый вал TB_2 , обеспечивающий движение P_4 радиальной подачи делительного стола. В итоге сложная группа $\Phi_s(P_3P_4)$ преобразуется в простую группу продольной подачи $\Phi_s(P_3)$, осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

При нарезании червячных колес муфтой 8 отключают тяговый вал TB_1 , обеспечивающий движение P_3 продольной подачи. В итоге сложная группа $\Phi_s(P_4)$ преобразуется в простую группу радиальной подачи $\Phi_s(P_4)$, осуществляющей радиальное врезание фрезы на высоту зуба колеса.

Данное техническое решение по сравнению с прототипами имеет более широкие технические возможности за счет обработки зубчатых колес с наклонными зубьями. Достигается это тем, что традиционная для зубофрезерных станков простая группа продольной подачи $\Phi_s(P_4)$ заменена сложной двухэлементарной группой $\Phi_s(P_3P_4)$. В результате благодаря одновременному согласованному поступательному движению червячной фрезы и делительного стола в двух взаимно перпендикулярных плоскостях линия зубьев колеса воспроизводится под углом к оси заготовки.

Заключение. Показано, что НТЭ кумулятивно, т.е. полностью или частично, но без изменений, включает в свой состав содержание других научных дисциплин. В частности, в НТЭ при описании кинематической структуры изобретений к патентам, защищающим металлорежущие станки как целостные объекты реальной действительности, доминирует парадигма [3], основанная на научном направлении, называемом кинематикой металлорежущих станков, базирующейся на известном в теоретической механике принципе возможных перемещений. По данной парадигме кинематика станка рассматривается как совокупность настраиваемых кинематических цепей. Показано, что последующая теория кинематической структуры металлорежущих станков [4], разработанная на основе закона разветвления энергии движения в кинематических цепях, разрешила противоречие между кинематической структурой и функцией металлорежущих станков, характерное для доминирующей парадигмы. По теории кинематической структуры металлорежущих станков – это совокупность кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное исполнительное движение. Достоинство этой теории – включение

в ее содержания теории настройки. Таким образом, строго на научной основе происходит эволюционная смена доминирующей парадигмы познания металлорежущих станков современной парадигмой, основанной на фундаментальных положениях теоретической механики. Рассмотрена возможность использования современной парадигмы познания металлорежущих станков НТЭ изобретений в станковедении. На примерах кинематической структуры зубообрабатывающих станков, признанных изобретениями, предложена методика составления формулы изобретения и его описание в терминах названной парадигмы. При этом при описании изобретений используется логико-математическая символика, характерная для общей теории систем. С целью повышения уровня информативности описания изобретений предложено включение в их содержание выводов формул настройки исполнительных органов станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракитов, А.И. Философские проблемы науки / А.И. Ракитов. – М. : Мысль, 1977. – 269 с.
2. Указания по составлению заявки на изобретение (ЭЗ-1-74) / Вопросы изобретательства. – 1974. – № 5. – С. 22–64.
3. Головин, Г.М. Кинематика станков / Г.М. Головин. – М. : МВТУ имени Баумана, 1946. – 253 с.
4. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – Изд. второе. – М. : Машиностроение, 1970. – 453 с.
5. Голембиевский, А.И. О выполнении чертежей к описаниям изобретений, объектом которых являются металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вопросы изобретательства. – 1980. – № 7. – С. 5–6.
6. Голембиевский, А. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков / А. Голембиевский. – Саарбрюккен : Academic Publishing Lap Lambert, 2019. – 149 с.
7. Способ долбления зубчатых колес и станок для его осуществления : пат. 3343 (BY) : В 23F 5/00 / А.И. Голембиевский, Ю.Я. Сидоренков, Г.В. Рейтер, А.К. Звонко ; дата публ.: 20.12.1999.
8. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 (BY) : В 23F 5/22 / А.И. Голембиевский ; дата публ. 29.12.2003.

Поступила 22.06.2020

METHOD OF USING THE MODERN PARADIGM KNOWLEDGE OF METAL-CUTTING MACHINES IN SCIENTIFIC AND TECHNICAL BACKGROUND OF THE INVENTIONS

A. GOLEMBIEVSKY

The possibility of using the modern paradigm of knowledge of metal cutting machines in the scientific and technical examination of inventions in machine tool science is considered. The feasibility of using the named paradigm is confirmed by the high level of scientific and technical expertise of inventions. The most rational use of this paradigm in the patent processing of metal cutting machines, when presenting them in the form of kinematic-layout schemes. In specific examples of gear machines that are recognized and protected from parasitic diseases, there is a methodology for writing descriptions and formulas in terms of a modern paradigm.

Keywords: scientific and technical examination of inventions, cumulateness, paradigm of knowledge of machine tools, paradigm terminology, kinematic structure, methodology for the description and claims.

УДК 658.512

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ
ДЛЯ СИНТЕЗА УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

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

Приводятся положения теории базирования для создания системы поддержки принятия решений синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров: разграничены понятия реального и проектного базирования при механической обработке, сборке и измерениях; определены понятия конструкторской и технологической баз, геометрической связи, комплекта баз, теоретической схемы базирования и установки; введены принципы однозначности и корректности ориентации конструктивных элементов. Представлена система поддержки принятия решений, которая позволяет с помощью упорядоченной совокупности проектных процедур производить автоматизированное проектирование 3D-моделей компоновок универсально-сборных приспособлений, их чертежей, а также технологических схем их сборки и разборки. Использование системы на машиностроительных предприятиях дает возможность снизить вероятность неустраняемого брака и временные затраты на подготовку производства.

Ключевые слова: корпусная деталь, универсально-сборные приспособления, автоматизация проектирования, базирование, подготовка производства, машиностроение.

Введение. В общей номенклатуре деталей, применяемых в машиностроении, корпусные детали составляют порядка 5–20%, 60% из них являются деталями средних габаритных размеров. Корпусные детали состоят из различных функциональных модулей и имеют высокие требования по точности их взаимного расположения. В том случае, если заданная точность взаимного расположения не обеспечена, то деталь неизбежно перейдет в неустраняемый брак. Задачи обеспечения точности взаимного расположения конструктивных элементов должны решаться на стадии проектирования технологии и станочных приспособлений за счет рационального выбора баз. Базирование – это такой инструмент, который позволяет на стадии проектирования технологии обеспечить взаимное расположение комплекса обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, равномерность снятия припуска с поверхностей, требуемые показатели точности размеров и допуски взаимного расположения конструктивных элементов.

В практической работе машиностроительных предприятий в большинстве случаев для каждой новой корпусной детали разрабатывается индивидуальный технологический процесс. Причем около 80% станочных приспособлений в этих технологических процессах составляют универсально-сборные приспособления (УСП). Сборка УСП для корпусных деталей осуществляется слесарями-сборщиками высокой квалификации по чертежу детали исходя из собственного опыта и интуиции. Проектирование компоновочной схемы приспособления зачастую не производится, а вопросы обеспечения точности взаимного расположения конструктивных элементов обрабатываемой детали, как правило, не рассматриваются.

Сократить трудоемкость проектирования в десятки раз и повысить качество проектных работ позволяет их автоматизация. Анализ работ по автоматизации проектирования УСП показывает, что в проектной практике находят применение базы данных 3D-элементов УСП. Их стоимость составляет 3–4 тыс. у.е. В настоящее время отсутствуют САПР УСП с инструментарием автоматического формирования компоновок приспособлений с учетом обеспечения требуемых допусков взаимного расположения конструктивных элементов [1–5].

Главной причиной отсутствия работоспособных систем автоматизации проектирования компоновок УСП для корпусных деталей является несовершенство положений теории базирования. Несмотря на многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные теории базирования в машиностроении, и введение ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» (далее ГОСТ), дискуссии по этому вопросу ведутся до сих пор.

Таким образом, целью работы является разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров, обеспечивающих на стадии проектирования заданные чертежом детали допуски взаимного расположения конструктивных элементов.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи: проведен анализ современных подходов к теории базирования и корректировка ее понятийного аппарата; проведен анализ конструкторской и технологической документации базовых машиностроительных предприятий; разработано

методическое и алгоритмическое обеспечение процедуры синтеза задания на проектирование универсально-сборных приспособлений; разработан алгоритм функционирования и общая структура системы поддержки принятия решений синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей; определена конфигурация технических средств; разработано программное обеспечение и проведены его комплексная отладка и предварительные испытания; разработаны программные документы; проведена опытная эксплуатация системы и производственные испытания.

Объект разработки – универсально-сборные станочные приспособления для корпусных деталей средних габаритных размеров и методы автоматизации их проектирования.

Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории автоматизации проектирования, теории базирования, системно-структурного анализа и моделирования, алгебры логики, теории множеств. Проводился анализ литературных источников, электронных изданий, опыта использования систем автоматизированного проектирования на предприятиях, а также анализ конструкторской и технологической документации в соответствующих бюро предприятий.

Результаты исследований. В ходе проведения исследований было проанализировано 360 информационных источников по тематике базирования в машиностроении. Установлено, что теорией базирования в машиностроении занимались многие известные исследователи. В работах К.М. Гладкова, Д.П. Маслова, Е.И. Глущенко, А.М. Каратыгина, Е.Г. Анненкова и др. не приводилось единого подхода к классификации баз и формированию основных понятий и определений теории. Выбор комплекта технологических баз рекомендовалось осуществлять на основе рекомендаций общего характера, пригодных для некоторых типов деталей (М.О. Якобсон, А.В. Эттель, Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер и др.).

К 1976 г. под руководством Б.С. Балакшина была разработана иерархическая классификация основных понятий и определений теории базирования, отраженная в ГОСТе. Последователи и ученики Б.С. Балакшина (Л.Н. Воробьев, А.А. Гусев, Ю.М. Соломенцев, И.М. Колесов и др.) в своих исследованиях часто использовали основные положения ГОСТа.

Уже после издания ГОСТа появились работы А.А. Маталина, В.А. Клевцова, В.И. Серебрякова, А.Г. Раковича, Б.Н. Байора, В.Н. Емельянова, Е.И. Колыбенко, Ф.Н. Абрамова, Б.М. Базрова и др., в которых авторы не согласны с некоторыми его положениями [6–15].

Так, в работах Б.М. Базрова [14; 15] под схемой базирования понимается распределение координат трех точек по координатным плоскостям по схеме 3-2-1. Двойная опорная база может лишать заготовку двух поворотов или одного перемещения и одного поворота. Приводятся новые обозначения опорных точек. Утверждается, что всего возможно 6 вариантов комплектов баз. Предлагаемые изменения, по мнению автора, «позволяют снять многие вопросы, возникающие при решении задач базирования». Однако какие именно вопросы и каким образом снимаются – неясно. Правила, алгоритмы проектирования схем базирования, установки, порядок смены баз, задания на проектирование приспособлений не приводятся.

Появление такого множества трактовок, концепций и подходов к проблеме базирования, очевидно, является следствием несовершенства положений указанного ГОСТа, а именно: 1) не разграничиваются понятия проектного и реального базирования, теоретической схемы базирования и установки для каждого из этапов жизненного цикла объекта производства; 2) понятие «базирование» относится исключительно к заготовке или изделию целиком, а не к поверхностям или элементам конструкции; 3) в определении технологической базы ничего не говорится о цели введения схемы базирования и комплекта баз при механической обработке, сборке и контроле; 4) в один уровень классификации, согласно которой все базы подразделяются на конструкторские (основные и вспомогательные), технологические и измерительные, выделены понятия по разным признакам.

Для трансформации теории базирования в средство синтеза компоновок УСП предлагается разграничить понятия *реального* и *проектного* базирования. Под *реальным технологическим базированием* будем понимать процесс: ориентации заготовки (или элементов заготовки) и формообразующих элементов инструмента в заданной зоне станка при механической обработке (реальное базирование при механической обработке); взаимной ориентации деталей, сборочных единиц или их элементов при сборке изделия (реальное базирование при сборке); ориентации средств измерения по отношению к измеряемому объекту в процессе измерения (реальное базирование при измерении).

При механической обработке обрабатываемые поверхности заготовки и формообразующие поверхности инструмента следует базировать так, чтобы направляющая и образующая будущих поверхностей были сориентированы относительно подач станка. В принципе, можно обрабатывать поверхности и на станке, даже если они не сориентированы относительно подач. Для этого необходимы дополнительное управление и измерения, которые бы соответствующим образом связывали перемещения. При такой обработке снижаются производительность и качество (форма поверхности), а также значительно повышается себестоимость.

В технологии машиностроения используются три метода реального базирования при механической обработке: выверкой по разметке; выверкой по реальной технологической базе; сопряжением (с помощью станочного приспособления).

При базировании заготовки в станочном приспособлении необходимо такое ориентирование *обрабатываемых компонентов заготовки* по отношению к направлениям движений подачи (стола и (или) формообразующего компонента инструмента), которое обеспечит заданные чертежом допуски взаимного расположения и размеров. Для сборочных приспособлений необходимо такое ориентирование сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей, которое обеспечит известные условия собираемости. Для контрольных приспособлений и комплексных калибров – ориентирование контролирующих компонентов относительно компонентов проверяемой детали, служащих началом отсчета, которое обеспечит надежное обнаружение годных и негодных (брак) деталей. Решение перечисленных задач при базировании сопряжением должно решаться на стадии проектирования приспособлений.

Процессу реального базирования должен предшествовать процесс *проектного базирования*. Под проектным базированием будем понимать процесс построения моделей реального базирования. Прежде чем изготавливать деталь, разрабатывается ее графическая модель (чертеж), модель технологического процесса ее изготовления и контроля и лишь затем модели необходимой оснастки.

При *конструировании детали* на ее чертеже с помощью размеров и допусков взаимного расположения задается ориентация рассматриваемого элемента конструкции по отношению к другим конструктивным элементам (т.е. задаются конструкторские базы). Под *конструкторской базой* будем понимать элемент геометрической (графической) модели *детали* (или сочетание элементов), определяющий одну из плоскостей или осей системы координат (как правило, декартовой), по отношению к которой задается ориентация другого (*рассматриваемого*) элемента.

Технологическое проектное базирование при механической обработке используется при проектировании технологического процесса обработки заготовки детали и станочных приспособлений. Проектное базирование при сборке используется при проектировании технологии сборки и сборочных приспособлений. Проектное базирование при измерении – при проектировании технологии измерения и самих средств измерений. Далее речь пойдет именно о процессе технологического проектного базирования при механической обработке.

Заготовка детали – промежуточное состояние объекта производства вплоть до выполнения последнего перехода заключительной операции технологического процесса. Для проектирования технологического процесса механической обработки заготовки необходимо сформировать геометрические модели ее состояния после выполнения переходов предварительного, чистового и отделочного этапов обработки (с учетом удаления напусков и припусков). Модели должны отражать поверхности, полученные в результате реализации рассматриваемого этапа, а также поверхности, полученные на предыдущих этапах. Для обеспечения *принципа единства конструкторских и технологических баз* (сокращения числа звеньев технологических размерных цепей) и уменьшения наследования погрешности получаемые поверхности необходимо структурно связать размерными связями и допусками взаимного расположения (задав их условными обозначениями) идентично их простановке на модели детали (чертеже). Условные обозначения размерных связей и допусков взаимного расположения поверхностей на моделях состояния заготовки ориентируют поверхности друг относительно друга.

Под *проектной технологической базой* при механической обработке (далее технологической базой) будем понимать элемент геометрической модели *заготовки детали* (или сочетание элементов), определяющий одну из плоскостей или осей системы координат (как правило, декартовой), по отношению к которой задается ориентация другого (*рассматриваемого обрабатываемого*) элемента. Указанную систему координат логично назвать *собственной*, т.к. она строится на элементах модели заготовки детали, или *базовой*, т.к. она определяет совокупность поверхностей, по отношению к которым ориентируется рассматриваемый обрабатываемый элемент (*состав технологических баз ориентации*).

По *характеру проявления* будем различать *явные* и *скрытые* базы. Скрытые базы – условные точки, линии и плоскости (например, симметрии). При реальном базировании речь может идти только о явных базах, при проектном – явных и скрытых.

По *виду* базы предлагается делить на *оси* и *плоскости*. Различные сочетания осей или плоскостей определяют составы технологических баз ориентации конструктивных элементов. Определено, что всего возможно четыре варианта составов баз ориентации, относительно которых возможны различные варианты угловой и размерной ориентации конструктивных элементов: 1) три взаимно перпендикулярные плоскости; 2) две взаимно перпендикулярные плоскости и одна ось, перпендикулярная к одной из этих плоскостей; 3) плоскость и две перпендикулярных к ней осей; 4) плоскость и две оси, одна из которых параллельна, а другая перпендикулярна к этой плоскости (рисунок 1).

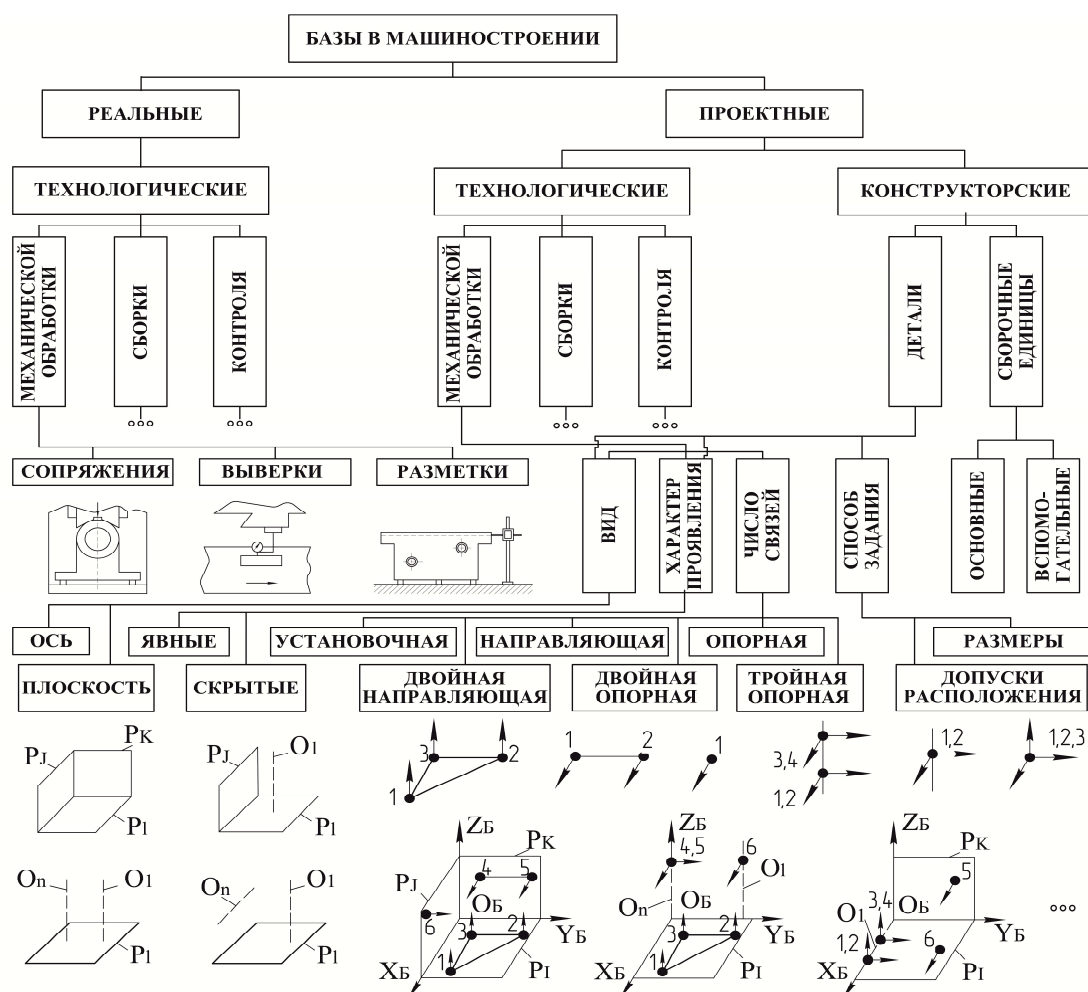


Рисунок 1. – Классификация баз

Относительное угловое положение оси осесимметричного элемента конструкции (поверхности вращения) на чертеже детали или оси рассматриваемой обрабатываемой поверхности на модели заготовки должно быть задано *необходимым и достаточным числом показателей*. Так, ось может быть: перпендикулярна только к одной плоскости или параллельна двум пересекающимся плоскостям, или параллельна к одной плоскости и составлять некоторый угол с плоскостью, которая перпендикулярна первой. Угловое положение плоского конструктивного элемента (плоскости) на чертеже детали или рассматриваемой обрабатываемой плоскости на модели заготовки также должно быть задано *необходимым и достаточным числом показателей*. Плоскость может быть перпендикулярна к двум пересекающимся плоскостям или к оси, или перпендикулярна к одной плоскости и составлять некоторый угол с другой, которая перпендикулярна к первой. Анализ взаимных угловых расположений оси и плоскости по отношению к базовым осям и (или) плоскостям позволил определить 62 возможных варианта однозначного задания допуска расположения.

Под целью проектного базирования будем понимать обеспечение (еще на стадии проектирования) требуемых показателей взаимного расположения поверхностей за счет наложения на поверхности баз ориентации *шести геометрических связей* (по аналогии с механическими связями). Связь отражает отсутствие неопределенности линейного (3 связи) и углового (3 связи) положения рассматриваемого обрабатываемого компонента относительно осей базовой системы координат и определяет положение точки сопряжения (соприкосновения) элементов геометрической модели заготовки с базовой системой координат.

Чтобы определить направление связи и направление оси базовой системы координат, предлагается использовать *понятие направляющего вектора*. Направляющий вектор – единичный вектор с началом в точке сопряжения, перпендикулярный соответствующей плоскости базовой системы координат и имеющий одинаковое направление с осью базовой системы координат. Направляющий вектор задает направление оси базовой системы координат. Поэтому формирование базовой системы координат осуществляется одновременно с наложением на геометрическую модель заготовки геометрических связей.

По числу точек сопряжения (налагаемых связей) базы предлагается делить на следующие типы: установочные, направляющие, опорные, двойные опорные, двойные направляющие базы (согласно ГОСТу). Также предлагается использовать новое понятие – тройная опорная база (см. рисунок 1).

С помощью понятий «точка сопряжения», «направляющий вектор» и «связь» несложно дать определение перечисленным базам. Так, под *установочной базой* предлагается считать три точки сопряжения, не лежащие на одной прямой и имеющие одинаковое направление направляющих векторов, накладывающиеся на геометрическую модель заготовки три связи: одну линейную и две угловых. Установочная база на модели заготовки может быть реализована: плоскостью; двумя образующими, которые принадлежат пересекающимся или параллельным цилиндрам и лежат в одной плоскости; образующими цилиндра и конуса, лежащими в одной плоскости; направляющей окружностью тора; наружными точками трех сфер, лежащих в одной соприкасающейся с ними плоскости; двумя пересекающимися (или параллельными) осями цилиндров. *Направляющая база* формируется двумя несшившимися точками сопряжения, имеющими одинаковое направление направляющих векторов. Двойная однонаправленная база накладывает на модель заготовки две связи, которые обеспечивают определенность расстояния обрабатываемого элемента геометрической модели заготовки вдоль одной из осей базовой системы координат и определенность углового положения (поворота) вокруг одной из двух других осей. Двойную однонаправленную базу можно реализовать: плоскостью модели заготовки; осью цилиндра; образующей цилиндра; точками, которые лежат на общей касательной к двум наружным цилиндрам; линией пересечения двух плоскостей и т.д.

Для наложения на геометрическую модель заготовки шести связей базы могут *сочетаться между собой в комплект* девятью различными способами: 1) установочная, направляющая и опорная базы; 2) установочная двойная опорная и опорная базы; 3) двойная направляющая и две опорные базы; 4) двойная направляющая и двойная опорная базы; 5) тройная опорная и три опорные базы; 6) тройная опорная, двойная опорная и опорная базы; 7) тройная опорная направляющая и опорная базы; 8) три направляющих базы; 9) три двойных опорных базы.

Варианты комплектов баз можно условно разделить на четыре класса. Первый класс объединяет варианты, в которых главной является установочная база. Второй класс – варианты, в которых главной является двойная направляющая база. К третьему классу относятся варианты, в которых главной является тройная опорная база. К четвертому классу – варианты, где нет главной базы, а комплект технологических баз образуется сочетанием трех одинаковых баз.

Под *теоретической схемой базирования* при механической обработке (или просто *схемой базирования*) будем понимать графическое изображение геометрической модели заготовки (абсолютно твердого тела, поверхности которого (в т.ч. плоскости, оси и центры симметрии) идеальны) в состоянии после обработки поверхностей за один установ на рассматриваемой операции, на которой выделены обработанные поверхности, проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков взаимного расположения, условные значки, интерпретирующие точки сопряжения и направляющие векторы, накладывающие *б связей*, а также проведена базовая система координат.

Под *теоретической схемой установки* будем понимать графическое изображение геометрической модели заготовки (абсолютно твердого тела, поверхности которого (в т.ч. плоскости, оси и центры симметрии) идеальны) в состоянии после обработки поверхностей за один установ на рассматриваемой операции, на которой выделены обработанные поверхности, проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков взаимного расположения и условные обозначения установочно-зажимных элементов приспособления, точки приложения и направления силы закрепления. Теоретическая схема установки – задание на выбор существующего или проектирование нового станочного приспособления.

Предлагаемые положения позволяют предложить следующую последовательность процедур проектирования УСП: 1) синтез конструкторско-технологической модели заготовки на этапах типовой схемы обработки; 2) синтез структуры операции (определение обрабатываемых на станке поверхностей, числа установов и составов баз ориентации); 3) синтез схемы базирования (определение комплектов баз); 4) синтез схемы установки (состав установочных и (или) установочно-зажимных элементов и определение точки приложения и направления силы закрепления); 5) синтез функциональной модели приспособления (список основных, вспомогательных и дополнительных функций); 6) определение характеристик окружающей среды (элементы станка для использования приспособление); 7) анализ допустимости выбранной схемы установки (оценка погрешности схемы установки); 8) разработка конструктивной схемы (компоновки) приспособления; 9) параметрический синтез приспособления (силовой расчет и расчет на точность); 10) разработка рабочих чертежей приспособления.

При переходе от первой процедуры проектирования к последней происходит наращивание объема информации о процессе реального базирования. Однако никогда модель базирования не может быть тождественна реальному процессу, но это и не требуется. Процедуры 1–4 играют особую роль в процессе проектирования технологического процесса и приспособления. Именно с их помощью

на стадии проектирования решаются задачи обеспечения заданных чертежом требований к точности взаимного расположения элементов конструкции.

Синтез конструкторско-технологической модели заготовки предлагается осуществлять с помощью набора функциональных модулей (ФМ), технологических регламентов их обработки, характеристик их элементов (внутренних показателей), а также структуры линейных и угловых связей между ФМ (внешних показателей [17; 18]). Хранение информации о внутренних показателях ФМ внутри этапов (предварительный, чистовой, отделочный) типовой схемы обработки предлагается осуществлять в виде базы данных соответствующего формата. Оперирование с внешними параметрами – с помощью неориентированных графов типа дерева обозначений размерных связей главных поверхностей ФМ в трех координатных направлениях $R_{(x,y,z)}$ для предварительного, чистового и отделочного этапов типовой схемы обработки $R_{(x,y,z)}^P$, $R_{(x,y,z)}^C$, $R_{(x,y,z)}^O$ (P , C , O – индексы, обозначающие заготовительный, предварительный, чистовой и отделочный этапы) и ориентированного графа угловых расположений U обрабатываемых поверхностей по отношению к необрабатываемым (индекс *обр-нобр*) и обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым (индекс *обр-обр*) $U_{n_1^{обр-нобр}}^P$, $U_{n_1^{обр-нобр}}^C$, $U_{n_1^{обр-нобр}}^O$, $U_{n_1^{обр-обр}}^P$, $U_{n_1^{обр-обр}}^C$, $U_{n_1^{обр-обр}}^O$. Для внутримашинного оперирования графы $R_{(x,y,z)}$ представляются с помощью матриц смежности, а графы U – в виде матриц инцидентности.

Выявление возможных составов баз ориентации (для рассматриваемой главной оси и плоскости ФМ) предлагается осуществлять с помощью совместного анализа графов размерных и угловых связей этапа. Для этого номер обрабатываемой поверхности (ее оси (O) или плоскости (P)) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) размерных связей. Определяется ее связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей (кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей). Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений обрабатываемых поверхностей комплект дополняется двумя поверхностями, для оси – одной поверхностью. Для определения принадлежности сформированных составов баз к одному из описанных выше определяется характер поверхности (ось или плоскость).

Для определения комплектов баз (числа налагаемых связей) предлагается использовать массив продукционных моделей, соответствующих вариантам однозначного задания ориентации ФМ [19]. Если ориентируется несколько главных поверхностей ФМ, то число связей следует определять с помощью ранжирования численных значений допусков по компонентам состава баз и последующего определения приоритета компонента (в зависимости от этого значения). Например, если относительно состава баз, состоящего из трех взаимно перпендикулярных плоскостей, ориентируется две оси и заданное численное значение допуска перпендикулярности одной оси относительно одной плоскости меньше численного значения допуска перпендикулярности второй оси относительно второй плоскости, то первая плоскость назначается установочной базой, а вторая направляющей.

Для формирования схемы установки и компоновки приспособления определен состав установочных, установочно-зажимных и прочих элементов УСП, сформирована база данных параметризованных моделей деталей комплектов ОАО «ВИСТАН» (Витебск), а также предложена общая структурная схема универсально-сборного приспособления (рисунок 2).

Для формирования состава установочных элементов УСП предлагается применять метод типовых технических решений, при реализации которого элементы комплекта схемы базирования заменяются соответствующими установочными элементами [19]. Для этого разработан массив сокращения вариантов технических решений для УСП (таблица 1).

При выборе вариантов технических решений учитываются следующие ограничения: тип производства, габариты и масса обрабатываемой детали, показатели качества базы, поверхность базирования (наружная, внутренняя), тип поверхности, характер базы (явная, скрытая), вид обработки (отделочная, чистовая, предварительная). Окончательно решение о выборе необходимого набора компонентов принимается с помощью интегральных показателей сложности состава установочных элементов на основе коэффициентов сложности (стоимости) установочных, установочно-зажимных компонентов. Разработаны ориентировочные таблицы сложности тех или иных установочных компонентов в зависимости от габаритных размеров. Данные таблицы построены на основе анализа прайс-листов на компоненты УСП.

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать систему поддержки принятия решений универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров при обработке на фрезерных обрабатывающих центрах. Система разработана как приложение графических твердотельных редакторов Компас и Autodesk Inventor. Пользователь систем средствами графического редактора проектирует трехмерную твердотельную модель детали с кодированием функциональных модулей, допусков взаимного расположения и линейных размеров.

1 Базовые детали							
1.1 Плиты квадратные и прямоугольные							
1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6	1.1.7	
1.2 Плиты круглые							
1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4	1.2.5	1.2.6	1.2.7	
...							
2 Корпусные детали							
2.1 Опоры угловые			2.2 Угольники крепежные				
2.1.1	2.1.2	2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.2.4	2.2.5	
2.3 Угольники ребристые							
2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6	2.3.7	2.3.8
2.4 Угольники с установочным отверстием				2.5 Угольники обыкновенные			
2.4.1	2.4.2	2.4.3	2.4.4	2.5.1	2.5.2	2.5.3	2.5.4
5 Установочные детали							
5.1 Призмы с хвостовиком			5.2 Призмы опорные				
5.1.1	5.1.2	5.2.1	5.2.2	5.2.3	5.2.4	5.2.5	
...							
5.5 Опоры квадратные			5.6 Опоры прямоугольные				
5.5.1	5.5.2	5.5.3	5.6.1	5.6.2	5.6.3		
5.7 Пальцы установочные цилиндрические и срезанные постоянные и сменные							
5.7.1	5.7.2	5.7.3	5.7.4	5.7.5	5.7.6		
...							

Рисунок 2. – Фрагмент классификатора параметризованных моделей компонентов УСП

Таблица 1. – Элементы таблицы соответствия и сокращения вариантов

База	Код	Габариты и масса обрабатываемой детали				Поверхность базирования		...
		м	с	к	ок	наружная	внутр.	...
Установочная	Тр 5.5.1	х	х			х		...
	Тр 5.5.2		х	х	х	х		...

Направляющая	Тр 5.5.1	х	х			х		...

...

В приложении задаются технологические возможности оборудования, векторы доступности для обработки и др. Пользователь может сам указать подлежащие обработке на операции конструктивные элементы. Далее система предлагает несколько вариантов маршрута обработки заготовки с указанием приоритетных базовых поверхностей для обеспечения допусков взаимного расположения функциональных модулей, состав установочных, установочно-зажимных и (или) зажимных элементов, рекомендует состав базовых, направляющих и прочих элементов УСП, формирует несколько вариантов трехмерных компоновок приспособления, монтажные чертежи, а также наглядные схемы сборки–разборки сложных компоновок.

Система проходит апробацию на ОАО «Вистан» (Витебск) и в учебном процессе УО «ВГТУ». Так, на рисунке 3 показана модель состояния заготовки детали «Рукав 422-240711» (ОАО «Вистан») на предварительном этапе, а также соответствующие графы. Деталь состоит из шести ФМ, образующих основную и вспомогательные сборочные базы, трех крепежных ФМ и ряда объединительных ФМ. В таблице 2 представлены составы баз ориентации.

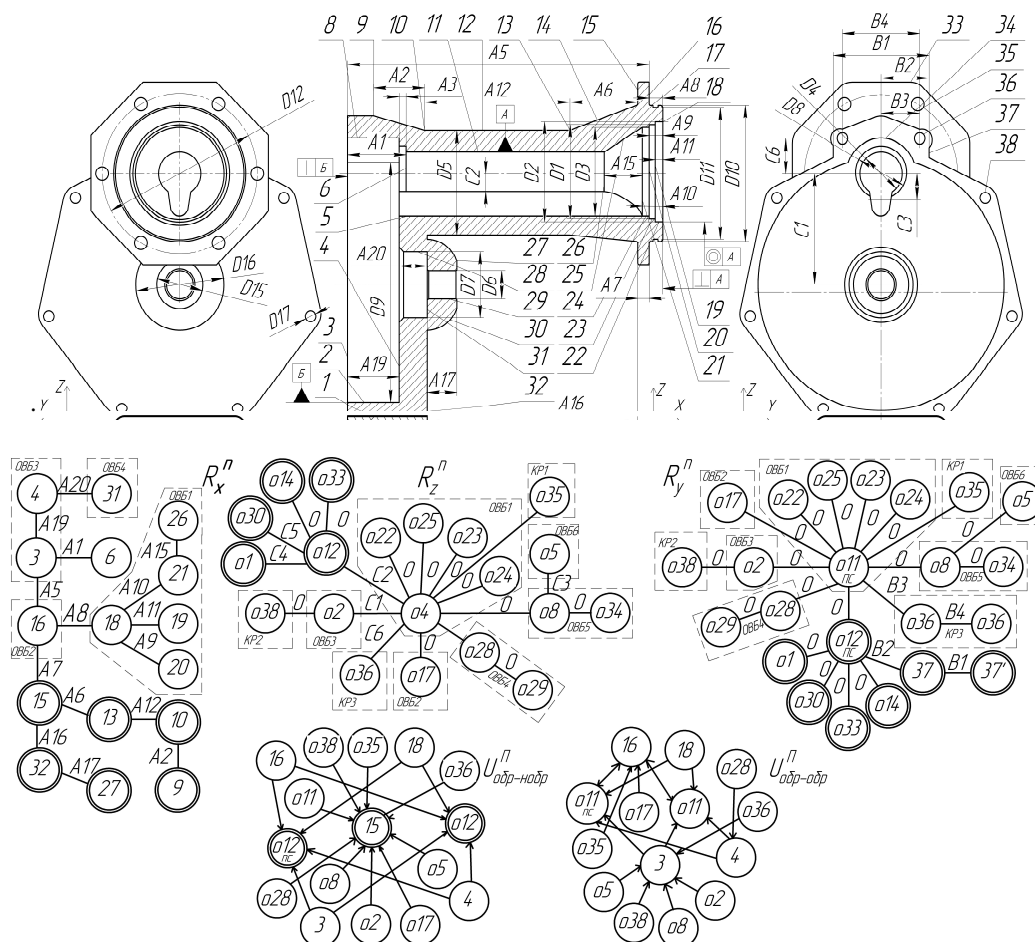


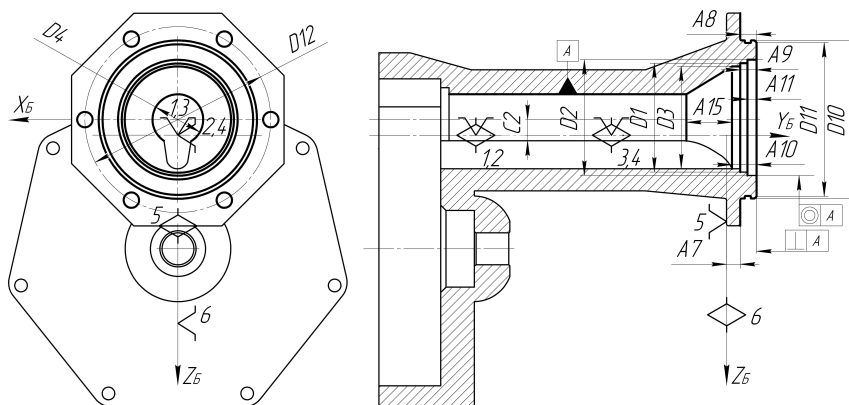
Рисунок 3. – Графическая модель состояния заготовки детали, а также соответствующие графы

Таблица 2. – Фрагмент таблицы составов баз ориентации

o11 (o22, o23 ...)	o17	o8	o5	18	16	...
o12-o12пс-15 o12-o12пс-16 o17-o17-15 o17-o17-16 o2-o2-15 ...	o11-o11пс-15 o11-o11пс-16	o11-o11пс-15 o11-o11пс-16 o5-o5-15 o5-o5-16	o8-o8-15 o8-o8-3	o12-o12пс-15 o11-o11пс-16	o12-o12пс-15 o11-o11пс-16	...

Пусть необходимо спроектировать приспособление обработки ФМ ОВБ1, 2 и КР1 (поверхности o11 (o22, o23 ...), o17, 1618, o35) от комплекта баз o12-o12пс-15. Состав баз ориентации – две плоскости и ось, лежащая в одной из плоскостей. Определение числа связей (комплекта технологических баз) сводится к производственной модели o22: если задан допуск параллельности (соосности) относительно оси O_1 , то ось O_1 назначается двойной направляющей базой, плоскости P_1 и P_2 назначаются опорными базами [19].

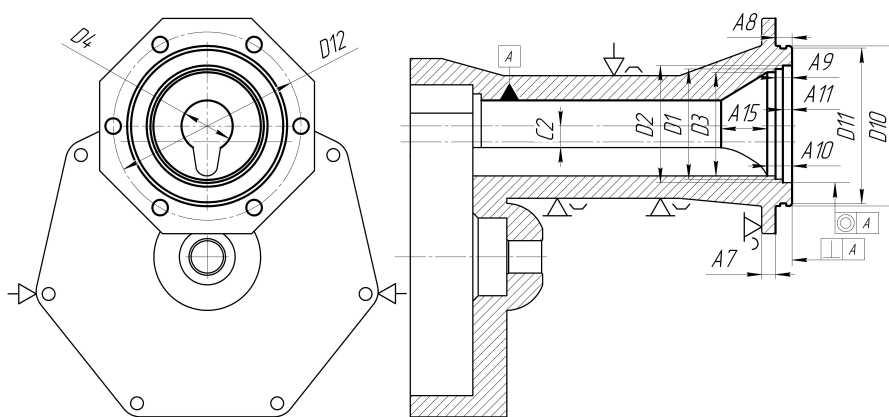
На рисунке 4 представлена схема базирования для рассматриваемой заготовки.



Условные обозначения направляющих векторов: ∇ – на виде сбоку; \diamond – в плане

Рисунок 4. – Схема базирования

Для представленной схемы базирования формируется массив приемлемых технических решений по составу установочных элементов Тр5.2.2, Тр5.2.2, Тр5.8.1... Тогда схема установки для рассматриваемой заготовки примет вид, представленный на рисунке 5.



Δ , \triangle , \triangleright – условные обозначения призматической опоры, точечной опоры со сферической поверхностью и точки приложения и направления силы закрепления соответственно

Рисунок 5. – Схема установки

На рисунке 6 представлены интерфейсы работы программного обеспечения, ассоциативные схемы сборки и чертежи УСП, выполненные с помощью системы (деталь «Рукав 422-240711», ОАО «Вистан»).

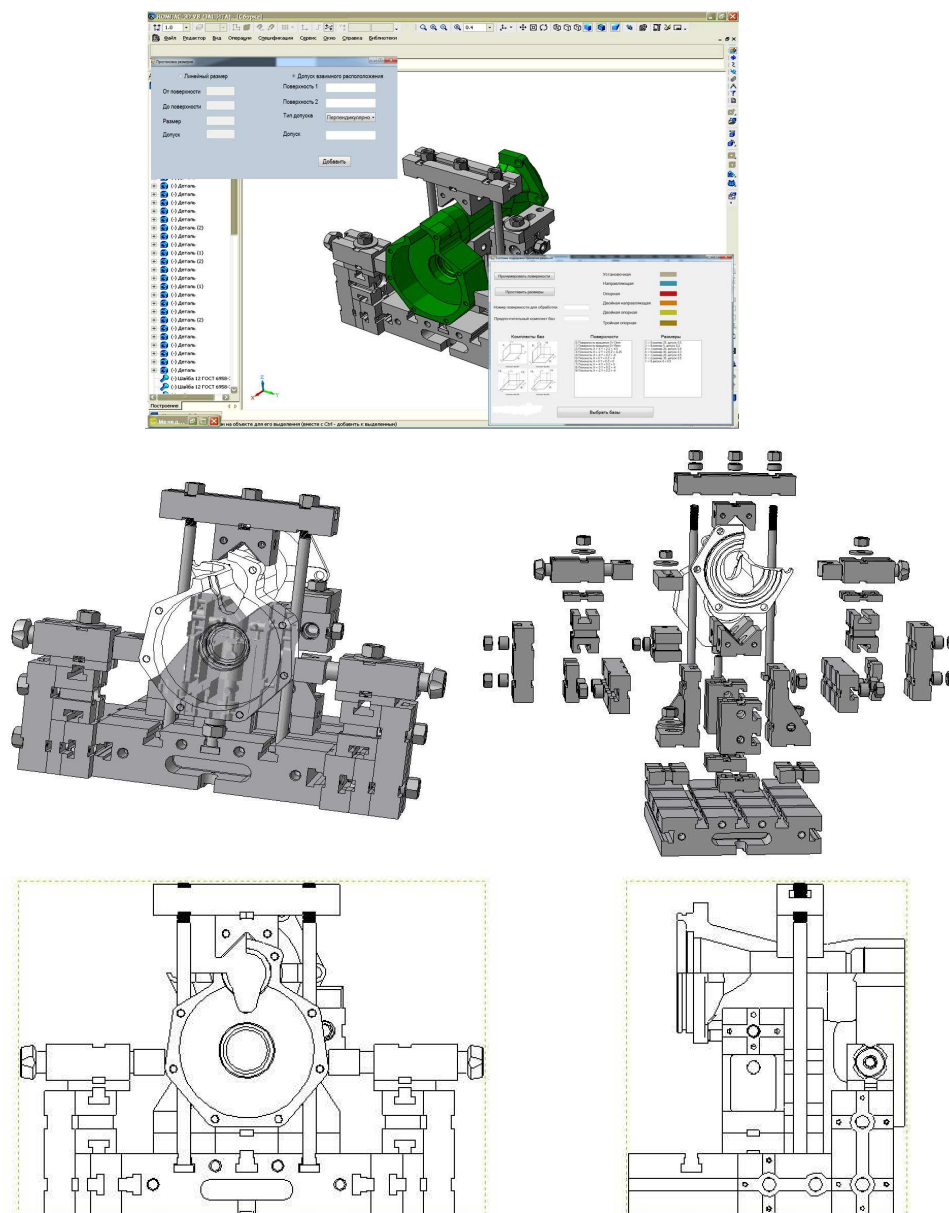


Рисунок 6. – Интерфейсы работы программного обеспечения, ассоциативные схемы сборки и чертежи УСП

Заключение. Предложена система понятий базирования, которая за счет разграничения реального и проектного базирования при механической обработке, сборке и измерениях, теоретической схемы базирования и установки и введения положения об однозначности и корректности ориентации конструктивного элемента позволяет моделировать универсально-сборные приспособления для заготовок корпусных деталей.

На основе сформулированных понятий базирования предложен новый подход к моделированию УСП для заготовок корпусных деталей, заключающийся в последовательном определении возможных составов баз ориентации для всех конструктивных элементов; группировании идентичных составов; проверке возможности обработки элементов конструкции за один установ на имеющемся оборудовании; идентификации составов баз ориентации; определении числа налагаемых связей и синтезе состава установочных элементов приспособления, который при реализации сокращает трудоемкость проектных работ.

Представление разработанных методик на языке теории графов, алгебры логики, теории множеств, теории алгоритмов и теории размерных цепей позволило создать систему поддержки принятия решений синтеза УСП для механической обработки оригинальных нетиповых заготовок корпусных деталей средних габаритных размеров и доказать их работоспособность. Разработанная система позволяет: снижать вероятность неустраняемого брака за счет научно обоснованного решения вопроса обеспечения допусков взаимного расположения конструктивных элементов детали на этапе проектирования компоновки; снижать временные

затраты на подготовку производства; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации; составлять наиболее рациональную номенклатуру пусковых комплектов; включить службу УСП в единую автоматизированную систему технологической подготовки производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, П.С. Визуальная база данных параметрических элементов универсально-сборных приспособлений / П.С. Петров, А. Н. Феофанов // Вестн. МГТУ СТАНКИН. – 2017. – № 2. – С. 30–31.
2. Серков, Е.А. Автоматизация процесса проектирования групповых станочных приспособлений / Е.А. Серков // Приборостроение. – 2010. – № 08. – С. 56–59.
3. Белов, Е.В. Разработка САПР УСП / Е.В. Белов, Е.С. Окунев // Тезисы докладов 52 Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – С. 254.
4. Южно-Уральский завод универсально-сборных приспособлений и технологической оснастки [Электронный ресурс] : Универсально-сборные приспособления (УСП) / Сайт производителя. – Электрон. текст. данные. – Режим доступа: <http://uspto.ru/>. – Дата доступа: 10.03.2020.
5. Завод специальной взаимозаменяемой технологической оснастки [Электронный ресурс] : Каталоги СВТ / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://svto.info/>. – Дата доступа: 10.03.2020.
6. Маталин, А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 464 с.
7. Базирование в проблеме разработки АСТПП / В. А. Клевцов [и др.] // Технологические исследования и разработки в системах автоматизированного проектирования : сб. науч. тр. – Владивосток, 1980. – С. 32–43.
8. Автоматизация проектирования ТП и средств оснащения / под ред. А.Г. Раковича. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.
9. Серебряков, В.И. Материализация схем базирования заготовок установочными элементами / В.И. Серебряков // Машиностроение : сб. науч. тр. / под ред. И.П. Филонова. – Минск : Технопринт, 2002. – Вып. 18. – С. 156–160.
10. Байор, Б.Н. О развитии методологии базирования / Б.Н. Байор // СТИН. – 2000. – № 3. – С. 24–26.
11. Емельянов, В.Н. О разработке теоретических схем базирования / В.Н. Емельянов // СТИН. – 2002. – № 1. – С. 32–34.
12. Колыбенко, Е.И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е.И. Колыбенко // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 10. – С. 56–63 ; № 11. – С. 49–55.
13. Абрамов, Ф.Н. О разработке терминологии базирования в машиностроении / Ф.Н. Абрамов // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 67–72.
14. Базров, Б.М. Теория и практика базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 5–10.
15. Базров, Б.М. Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2017. – № 5. – С. 6–11.
16. Попок, Н.Н. Методы и модели компьютерного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей / Н.Н. Попок, Н.В. Беляков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 3. – С. 68–75.
17. Беляков, Н.В. Информационная модель объекта производства в задаче компьютерного проектирования технологических процессов изготовления нетипизированных деталей / Н.В. Беляков, Н.Н. Попок // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2009. – Вып. 17. – С. 111–117.
18. Система автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях Витебской области / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 2–11.
19. Махаринский, Е.И. Методика синтеза индивидуальных технологических процессов изготовления корпусных деталей машин / Е.И. Махаринский, Н.В. Беляков // Вестн. машиностроения. – № 2. – 2005. – С. 57–65.

Поступила 04.06.2020

**PRACTICAL APPLICATION OF BASING THEORY
FOR SYNTHESIS UNIVERSAL-PREFABRICATED DEVICES**

N. POPOK, N. BELYAKOV, Y. MAKHARINSKY, D. LATUSHKIN

Are proposals theory-based to create a system of decision support for the synthesis of versatile layouts-prefabricated accessories for body parts medium dimensions: distinction between real and project-based machining, Assembly and measurements; defines the concepts of design and technological bases, geometric relationships of a set of databases, theoretical schemes of deployment and installation; introduced a principles on the uniqueness and correctness of the orientation of the structural elements. The presented decision support system allows using an ordered set of design procedures to perform computer-aided design of 3 - d models of universal Assembly devices, their drawings, as well as technological schemes for their Assembly and disassembly. The use of the system in machine-building enterprises allows you to: reduce the probability of irretrievable marriage and the time spent on production preparation.

Keywords: housing part, universal-assembled devices, design automation, basing, production preparation, mechanical engineering.

УДК 621.774

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРОВКИ РУЧЬЯ КАЛИБРА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Q -ФАКТОРА ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ

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

Приведены результаты исследования влияния параметров калибровки ручья калибра стана холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации. От величины Q -фактора зависит, как будут ориентироваться зерна металла – радиально или тангенциально, что оказывает значительное влияние на механические характеристики труб. Определено, что степень крутизны обуславливает характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации. Найдены наиболее оптимальные значения степени крутизны и начальной конусности (с точки зрения распределения Q -фактора и силы прокатки вдоль зоны обжатия).

Ключевые слова: стан ХПТ, оптимальное распределение, Q -фактор, сила прокатки, параметры калибровки.

Введение. Холоднокатаные трубы из титановых и циркониевых сплавов широко используются в атомной промышленности (оболочки ТВЕЛ и пр. [1]), авиакосмической отрасли (гидросистемы самолетов и пр. [3–6]) и других отраслях, для изготовления деталей машин ответственного назначения [1–4]. К данным трубам предъявляются повышенные требования как к наличию определенного типа текстуры [5–7], так и к обеспечению высокой точности геометрических размеров поперечного сечения (AMS 4945, AMS 4946, OСТ1 90065-72) [3]. Трубы указанного сортамента изготавливаются методом холодной пильгерновой прокатки на станах ХПТ и ХПТР. Одним из параметров, оказывающих значительное влияние на механические свойства и текстуру металла труб, является Q -фактор (отношение действительной деформации по толщине стенки к действительной деформации по среднему диаметру трубы).

Материалы и инструменты. Для анализа выбран промежуточный маршрут прокатки трубы из сплава Ti-3Al-2.5V на стане ХПТ-55 – 50,8x4, 75-38, 1x2, 275. Именно к данному виду трубопрокатной продукции предъявляются требования по распределению Q -фактора вдоль конуса деформации (согласно стандарту AMS 4945). В данном маршруте можно выделить следующее: максимально возможная начальная конусность оправки с криволинейной образующей формы рабочей поверхности $2\text{tg}\alpha = 0,016$; длина рабочей зоны оправки – 380 мм; длина конуса деформации (при начальном диаметре ведущей шестерни 336 мм) – 445 мм. Расчет распределения Q -фактора вдоль конуса деформации производился по контрольным точкам калибровки рабочего инструмента (57 сечений от пережима до конца зоны редуцирования).

Распределение Q -фактора вдоль конуса деформации производилось для следующих случаев выполнения калибровки инструмента: $2\text{tg}\alpha = 0,005$; $2\text{tg}\alpha = 0,01$; $2\text{tg}\alpha = 0,015$; $n = 1,5$; $n = 2,5$; $n = 3,5$. Расчетная величина подачи $m = 5$ мм. Кроме распределения Q -фактора рассчитывались изменения силы прокатки в контрольных сечениях вдоль конуса.

Цель работы – определение влияния степени крутизны образующей развертки ручья калибра (n) стана ХПТ на изменение распределение величины Q -фактора вдоль конуса деформации.

Анализ исследований. Холодной пильгерновой валковой прокаткой труб производят прецизионные трубы с повышенными требованиями к чистоте наружной и внутренней поверхностей, точности их геометрических размеров, микро- и макроструктуре и механическим свойствам их материала и пр. [8–13]. Холодная прокатка – это многопроходный процесс. Например, труба размером 19x0,6 мм изготавливается за семь проходов на станах ХПТ-120, ХПТ-90, ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32 (поочередно) по маршруту 137x21 мм → 114x13 мм → 95x8 мм → 80x5 мм → 63x3 мм → 42x1,9 мм → 25x1,1 мм → 19x0,6 мм. Суммарные деформации по проходам составляют 46,1% → 47% → 46,1% → 52% → 57,7% → 65,5% → 58% соответственно [3]. Расходный коэффициент металла на таком технологическом маршруте ~ 1,55 [3]. После каждого прохода осуществляется ряд операций промежуточной отделки: обезжиривание после прокатки (снятие смазки), термообработка, травление, контроль качества и порезка, нанесение подмазочного слоя и смазки, далее трубы снова прокатываются на стане ХПТ.

Для каждого прохода, исходя из параметров трубы-заготовки и готовой или пердедельной трубы, можно рассчитать величину Q -фактора:

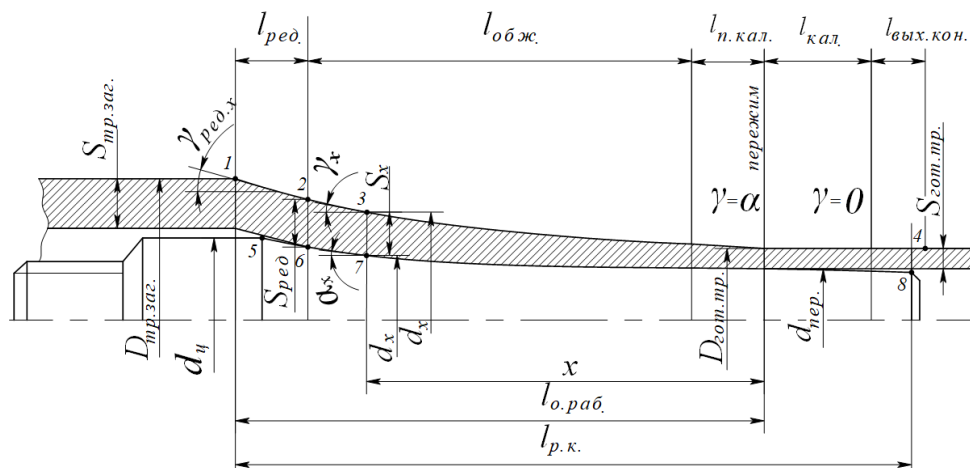
$$Q = \frac{\ln \frac{S_{\text{тр.заг.}}}{S_{\text{гот.тр.}}}}{\ln \frac{D_{\text{тр.заг.}} - S_{\text{тр.заг.}}}{D_{\text{гот.тр.}} - S_{\text{гот.тр.}}}}, \quad (1)$$

где $S_{тр.заг.}$ – толщина стенки трубы-заготовки;
 $D_{тр.заг.}$ – диаметр трубы-заготовки;
 $S_{гот.тр.}$ – толщина стенки готовой или передельной трубы;
 $D_{гот.тр.}$ – диаметр трубы готовой или передельной трубы.

Однако в станах холодной пильгерной прокатки труба, проходя конус деформации, обжимается много раз (в зависимости от длины конуса деформации, величины обжатия и величины подачи). Сам процесс ХПТ можно представить как движущийся вдоль конуса мгновенный очаг деформации (МОД), параметры которого постоянно изменяются. Поэтому кроме информации об общей величине Q -фактора за проход необходимо знать распределение его величины вдоль конуса деформации. В каждом контрольном сечении величину Q -фактора можно рассчитать по формуле

$$Q = \frac{\ln \frac{S_{i-1}}{S_i}}{\ln \frac{D_{i-1} - S_{i-1}}{D_i - S_i}}, \quad (2)$$

где S_{i-1} – толщина стенки трубы до деформации в мгновенном очаге деформации;
 D_{i-1} – диаметр трубы до деформации в мгновенном очаге деформации;
 S_i – толщина стенки после деформации в мгновенном очаге деформации;
 D_i – диаметр трубы после деформации в мгновенном очаге деформации.



кривые 1, 2, 3, 4 и 5, 6, 7, 8 – соответственно продольные профили оправки и рабочего конуса (конуса деформации); сечение конуса 2–6 – конец участка редуцирования; 3–7 – сечение профиля в участке, отстоящего от пережима на расстоянии x ; $d_{ц}$, $d_{пер.}$ – диаметры оправки в цилиндрической части и в пережиме; D_x , d_x – диаметры рабочего конуса и оправки в сечении x ; α_x – конусность оправки в сечении x ; $\gamma_{ред.x}$ – конусность развертки калибра в сечении x зоны редуцирования; γ_x – конусность развертки калибра в любом сечении x ; $l_{р.к.}$, $l_{обж.}$, $l_{кал.}$, $l_{п.кал.}$ – длины участков рабочего конуса соответственно: рабочего, обжимного, калибрующего, предкалибрующего (предотделки), калибровки, обратного (выходного)

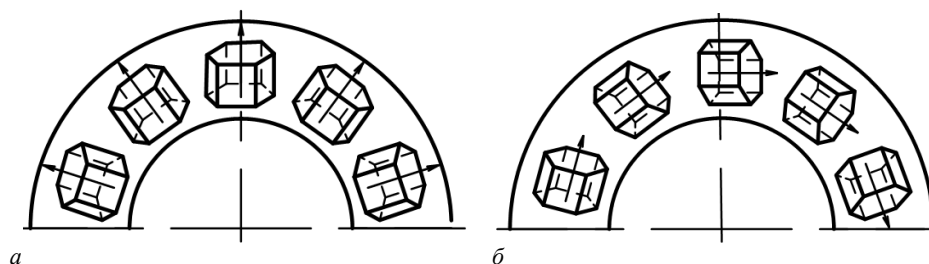
Рисунок 1. – Конус с оправкой, имеющей криволинейную образующую формы рабочей поверхности в момент, после которого следует подача перед очередным двойным ходом [6–14]

От величины Q -фактора зависит, как зерна металла трубы будут ориентированы после деформации и последующей термообработки (рисунок 2) [1; 6–8]. Требования к характеру распределения и величине Q -фактора внесены в стандарт на определенные виды трубопрокатной продукции (см. выше).

При использовании труб в гидросистемах (в авиационной и космической отрасли) и др. необходимо, чтобы материал трубы имел радиальную текстуру. Такие трубы имеют более благоприятное сочетание прочности и пластичности, повышенную усталостную прочность и пр. [1; 4; 5; 7; 9]. Для достижения такого эффекта величина Q -фактора во всех сечениях зоны обжатия вдоль конуса деформации должна быть не ниже единицы. Слишком большие значения Q -фактора тоже нежелательны, т.к. чрезмерное количество зерен будут радиально ориентированы и трубы не пройдут испытания на механические характеристики.

В формулу определения величины Q -фактора входит величина обжатия по среднему диаметру трубы и обжатия по толщине стенки, поэтому все факторы, от которых зависят эти параметры (даже

температурные искажения геометрических параметров рабочего инструмента), оказывают влияние в той или иной степени. На характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации влияют такие параметры процесса ХПТ [1; 4; 5; 7; 9; 14–17], как тип применяемой оправки (конусная или с криволинейной образующей); ее конусность (для конусных оправок); начальная конусность и степень крутизны рабочего профиля оправки и калибра (при применении оправки с криволинейной образующей рабочего профиля); заложенный в распределении диаметров калибра и диаметров оправки режим деформации по толщине стенки; величина и характер колебаний толщины стенки трубы-заготовки и пр. Степень влияния каждого из факторов до конца не изучена, любые исследования в этой области являются актуальными.



а – высокое значение Q -фактора, радиальная структура;
б – низкое значение Q -фактора, тангенциальная структура [15]

Рисунок 2. – Влияние распределения значений Q -фактора на текстуру металла труб

При расчете калибровки рабочего инструмента распределение диаметров калибра по контрольным сечениям конуса деформации определяют по формуле [14]

$$D_i = D_{mp.зак.} + (D_{zom.мп.} - D_{zom.мп.} - \gamma_{min} \cdot l) \left(\frac{x}{l} \right)^n + \gamma_{min} \cdot x, \text{ мм}, \quad (3)$$

где γ_{min} – минимальная конусность ручья в конце конуса деформации;

x – координата сечения;

n – степень крутизны образующей развертки ручья калибра x ;

l – длина зоны обжатия конуса деформации.

По аналогичной формуле находят диаметры оправки в тех же контрольных сечениях [14]:

$$d_i = d_{нер.} + (d_y - d_{нер.} - \alpha_{min} \cdot l) \left(\frac{x}{l} \right)^n + \alpha_{min} \cdot x, \text{ мм}, \quad (4)$$

где α_{min} – минимальная конусность оправки перед сечением пережима.

Один из параметров, влияющих на распределение величины обжатия по толщине стенки и обжатия по диаметру вдоль конуса деформации, – это степень крутизны образующей развертки ручья калибра.

Основная часть. Толщину стенки трубы и диаметр трубы до деформации вычисляют методом интерполяции данных калибровки.

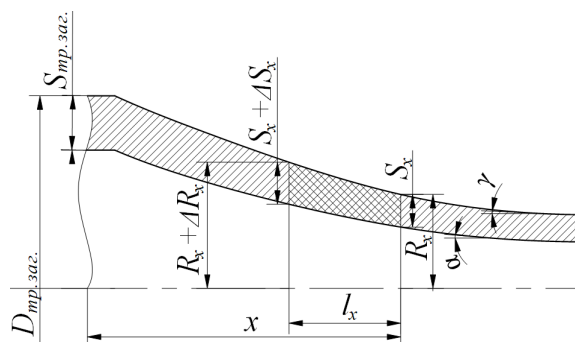


Рисунок 3. – Схема к определению величины обжатия вдоль конуса деформации за двойной ход клетки

Исходными данными для интерполяции служила величина смещения каждого рассматриваемого сечения в ходе пластической деформации за двойной ход клетки (см. рисунок 3), которая рассчитывалась по формуле [18; 19]

$$l_x = \frac{\sqrt{S_x^2 + 2(\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x) \frac{mS_{\text{пр.заг.}}(S_{\text{пр.заг.}} - D_{\text{пр.заг.}})}{D_x - S_x}} - S_x}{\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где m – величина подачи трубы перед двойным ходом;

$\operatorname{tg}\alpha_x$ и $\operatorname{tg}\gamma_x$ – конусность оправки и конусность образующей развертки ручья калибра на рассматриваемом участке калибровки.

На рисунке 4 показаны графики распределения Q -фактора в случае калибровки инструмента при начальной конусности оправки $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$. Начальная конусность развертки калибра ($2\operatorname{tg}\gamma$) тоже равна указанной величине $2\operatorname{tg}\alpha$ (здесь и далее). Как видно, при $n = 1,5$ вдоль зоны обжатия конуса деформации наблюдается постоянное увеличение Q -фактора. Вблизи и на протяжении зоны предотделки наблюдается падение этой величины (до $Q = 2,41$). Максимальное значение Q -фактора – 3,71 (49-е сечение), в начале зоны обжатия $Q = 2,4$. График силы прокатки коррелируется с графиком распределения Q -фактора. Начиная с 248,9 кН, значения силы прокатки сначала возрастают до величины 326,18 кН (41-е сечение), далее наблюдается плавное снижение этого значения до 138,15 кН в конце предотделки. Такое распределение Q -фактора вдоль конуса является одним из оптимальных характеров распределения этой величины. Распределение силы прокатки (с пиком в конце) не является приемлемым, т.к. повышенная сила прокатки вызовет усиление упругих деформаций клетки, что может отрицательно сказаться на качестве геометрии труб и качестве их внешней поверхности.

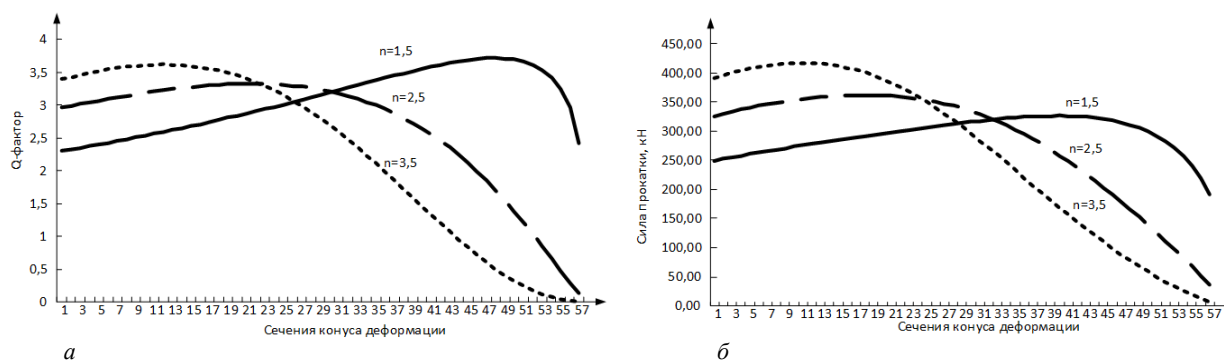


Рисунок 4. – Распределение вдоль конуса деформации Q -фактора (а) и силы прокатки (б) при $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$ (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275, $m = 5$)

При $n = 2,5$ и $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$ (см. рисунок 4) наблюдается куполообразный график распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия. Наибольшее значение $Q = 3,323$ в 23-м сечении. В конце зоны обжатия Q -фактор принимает значение 1,031 и далее; в зоне предотделки (здесь калибруется толщина стенки) значение Q -фактора падает до 0,128. Эта зона не предназначена для обжатия стенки, она обеспечивает ее точность. Распределение силы прокатки тоже имеет куполообразный характер с максимумом $P = 361,72$ кН в 19-м сечении. После него идет плавное снижение значений этой величины до 97,1 кН в конце зоны обжатия и 16,53 кН в конце зоны предотделки. Это один из оптимальных характеров распределения силы прокатки вдоль конуса. Следует заметить, что в зоне обжатия Q -фактор не падает ниже единицы, что тоже является приемлемым вариантом распределения Q -фактора.

При $n = 3,5$ и $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$ (см. рисунок 4) также, как и в предыдущем случае, наблюдается куполообразный график Q -фактора вдоль зоны обжатия, но с пиком $Q = 3,617$ в 13-м сечении. В конце зоны обжатия $Q = 0,11$, в конце зоны предотделки $Q = 0,005$. Значения Q -фактора опускаются ниже единицы уже в 45-м сечении. Этот случай не является оптимальным с точки зрения распределения Q -фактора. Купол силы прокатки имеет пик в 417 кН в 12-м сечении, в конце зоны обжатия $P = 41,48$ кН, в конце зоны предотделки – 2,18 кН. Из ранее рассмотренных случаев такое распределение силы прокатки вдоль конуса деформации является наиболее оптимальным.

Далее рассматриваем распределения Q -фактора в случае калибровки рабочего инструмента стана ХПТ с $2\operatorname{tg}\alpha = 0,01$ (рисунок 5).

При $2tg\alpha = 0,01$ и $n = 1,5$ характер изменения Q -фактора вдоль зоны обжатия остался прежним (как и при $2tg\alpha = 0,005$), но с меньшим максимум ($Q = 3,402$) в 43-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с $2tg\alpha = 0,005$ и тем же значением степени крутизны) меньше одного процента во всех сечениях.

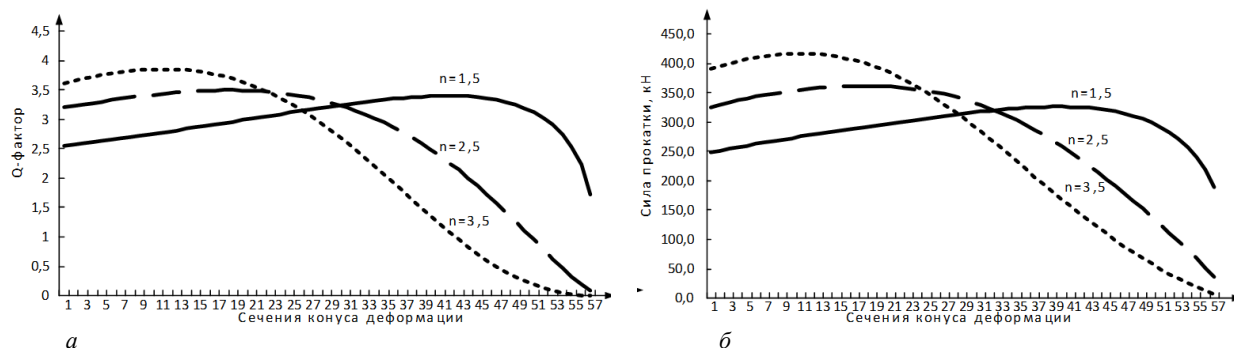


Рисунок 5. – Распределение вдоль конуса деформации Q -фактора (а) и силы прокатки (б) при $2tg\alpha = 0,01$ (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275, $m = 5$)

При $2tg\alpha = 0,01$ и $n = 2,5$ (см. рисунок 5) снова получаем куполообразное распределение Q -фактора (как и при $2tg\alpha = 0,005$ и $n = 2,5$) с пиком в $Q = 3,496$ в 19-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с $2tg\alpha = 0,005$ и $n = 2,5$) также меньше одного процента во всех сечениях.

При $2tg\alpha = 0,01$ и $n = 3,5$ (см. рисунок 5) имеем то же куполообразное распределение Q -фактора (как и при $2tg\alpha = 0,005$ и $n = 3,5$) с пиком в $Q = 3,8535$ в 13-м сечении, с той же сравнительной разницей в значениях силы прокатки. Интересно, что значения Q -фактора в конце зоны обжатия несколько уменьшились: при $n = 1,5$ $Q = 2,92$; при $n = 2,5$ $Q = 0,63$; при $n = 3,5$ $Q = 0,09$.

Рассматривая случай прокатки при $2tg\alpha = 0,015$, определяем, что характер графиков распределения и Q -фактора и силы прокатки остаются прежними, но значения этих величин несколько изменились (рисунок 6).

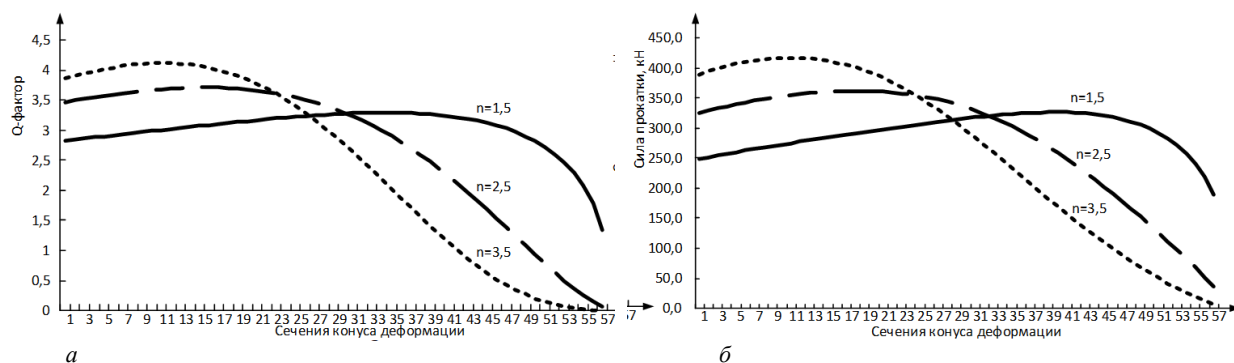


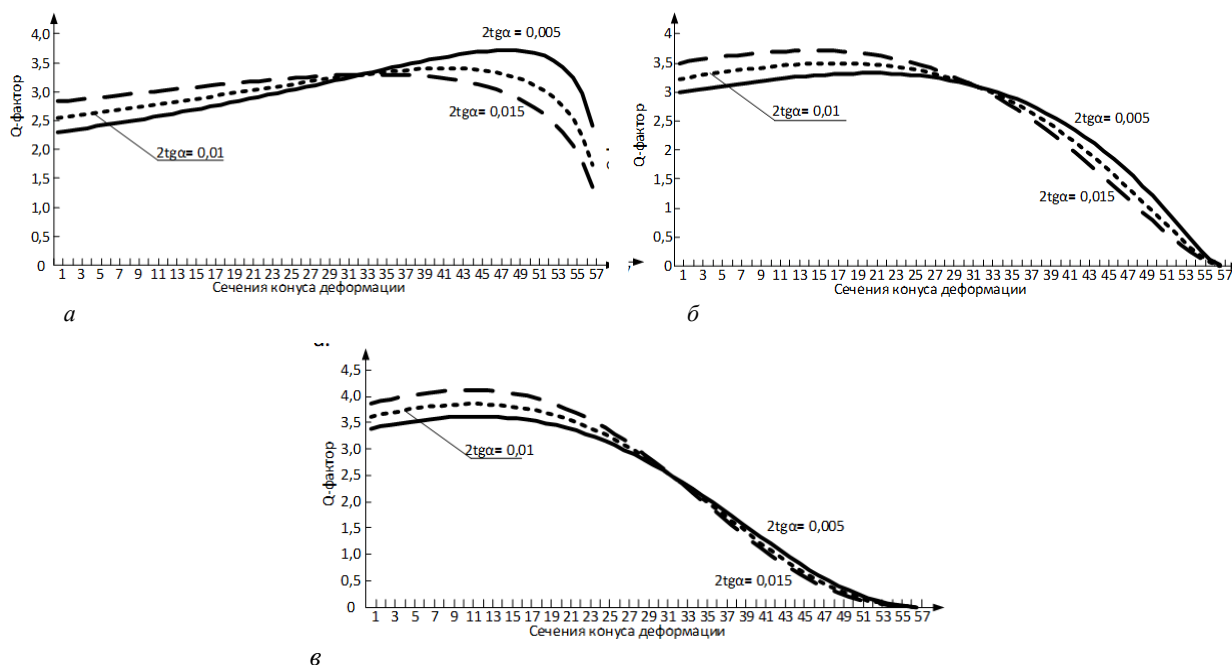
Рисунок 6. – Распределение вдоль конуса деформации Q -фактора (а) и силы прокатки (б) при $2tg\alpha = 0,015$ (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275, $m = 5$)

При $2tg\alpha = 0,015$ и $n = 1,5$ (см. рисунок 6) на графике имеется максимум значения Q -фактора ($Q = 3,294$) в 36-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с $2tg\alpha = 0,005$ и $n = 1,5$) меньше одного процента. В 41-м сечении наблюдается максимум силы прокатки в $P = 326,3$ кН. Распределение Q -фактора более равномерно, чем в других случаях калибровок при $n = 1,5$. Значения Q -фактора также не падают ниже единицы даже в зоне предотделки. Это показатель того, что вдоль зоны предотделки продолжается процесс обжатия стенки. Следует отметить, что величины обжатий значительно ниже допуска на толщину стенки. Сила прокатки в конце зоны предотделки не падает ниже 190,1 кН – негативный фактор, приводящий к значительным упругим деформациям клетки и валков.

При $2tg\alpha = 0,015$ и $n = 2,5$ (см. рисунок 6) Q -фактор принимает максимальные значения в 17-м сечении ($Q = 3,712$). В конце конуса деформации Q -фактор принимает значение $Q = 0,49$, что меньше единицы, и дальше его значения снижаются. Разница в значениях силы прокатки незначительна (сравниваем с $2tg\alpha = 0,005$ и $n = 2,5$).

При $2\text{tg}\alpha = 0,015$ и $n = 3,5$ (см. рисунок 6) максимальные значения Q -фактора наблюдаются в 12-м сечении ($Q = 4,12$). В конце конуса деформации Q -фактор принимает значение $Q = 0,06$ при дальнейшем снижении этого значения. Разница в значениях силы прокатки также незначительна (сравниваем с $2\text{tg}\alpha = 0,005$ и $n = 3,5$).

В целом степень крутизны (n) оказывает большее влияние на характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации, чем начальная конусность (рисунок 7). То же можно сказать и о силе прокатки.



a – при $n = 1,5$; *b* – при $n = 2,5$; *v* – при $n = 3,5$
(сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275, $m = 5$)

Рисунок 7. – Распределение Q -фактора вдоль конуса деформации

Заключение. Анализ влияния степени крутизны (n) рабочей зоны оправки и образующей развертки ручья калибра стана холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации показал следующее:

1. Степень крутизны оказывает большее влияние на характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации, чем начальная конусность.

2. Для прокатки выбранного сортамента труб при значении степени крутизны в $n = 2,5$ и начальной конусности $2\text{tg}\alpha = 0,005$ имеется наиболее благоприятное сочетание характеристик распределения Q -фактора и силы прокатки. Значение Q -фактора в зоне обжатия стенки не падает ниже единицы. Из-за низкой величины начальной конусности величина редуцирования в зоне предотделки (здесь обжатие по толщине стенки отсутствует) не оказывает значительного негативного воздействия на структуру металла. Сила прокатки в конце зоны предотделки равняется 16,2 кН.

3. При значении степени крутизны в $n = 2,5$ при всех значениях начальной конусности в конце зоны обжатия Q -фактор принимает значения намного меньше единицы, что не приемлемо для прокатки выбранного сортамента труб. Распределение силы прокатки наиболее благоприятное, чем во всех случаях применения значений степени крутизны.

4. При значении степени крутизны в $n = 1,5$ на протяжении всего конуса деформации значение Q -фактора не падает ниже единицы (даже в зоне предотделки), более того – растет вдоль зоны обжатия по ходу прокатки. Падение значения Q -фактора в зоне предотделки и около нее незначительно. Сила прокатки имеет недопустимый характер распределения. Ее величина растет вдоль всей зоны обжатия при незначительном падении в зоне предотделки (и перед ней). Даже в конце зоны предотделки сила прокатки принимает значения, которые не позволяют вести прокатку с приемлемой величиной подачи, снижая производительность процесса до минимума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abe, H. Method of Evaluating Workability in Cold Pilgering of Zirconium Alloy Tube / H. Abe, M. Furugen // Materials Transactions. – 2010. – Vol. 51, No. 7. – P. 1200–1205.

2. Филяева, Е.А. Технологические особенности изготовления труб из титановых сплавов / Е.А. Филяева, Я.И. Космацкий // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Металлургия. – 2017. – № 2. – С. 70–76.
3. Мищенко, А.В. Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана / А.В. Мищенко // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3–4 (310–311). – С. 58–68.
4. Houghon, A.C. Aspects of texture control with Ti-3Al-2.5V seamless cold worked aircraft hydraulic tube / A.C. Houghon, A.W. Bowen // Ironmaking and Steel making. – 1995. – No. 1. – С. 68–70.
5. Balakin, V.F. Influence of the parameters of the process of the cold pilger tube rolling on the Q -factor distribution along the cone of deformation / V.F. Balakin, S.V. Pilipenko // Itatube-journal. – 2016. – No. 1. – С. 94–97.
6. Текстурные характеристики опытной партии твэльных труб из сплава КТЦ-110 / В.М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2000. – № 2. – С. 86–93.
7. Пилипенко, С.В. Исследование влияния параметров процесса ХПТ на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 247–251.
8. Технология изготовления изделий из циркониевых сплавов для атомной энергетики и некоторые свойства сплавов циркония. Обзор / В.М. Ажажа [и др.]. – Харьков : ИФТТ МТ ННЦ ХФТИ, 1999.
9. Компьютерное моделирование процесса холодной прокатки циркониевых труб-оболочек ТВЕЛ / Г.В. Вольфович [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – № 3. – С. 89–91.
10. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov [et al.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2018. – No. 9. – P. 72–79.
11. Schulze, H.D. Propagation of circumferential and longitudinal cracks in straight pipes and pipe bends / H.D. Schulze, G. Togler, E. Bodmann // Nuclear engineering and design. – 1980. – No. 58. – P. 19–31.
12. Krishna Aditya Y. V. Complexity of pilgering in nuclear applications / Krishna Aditya Y. V. // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 41–46.
13. Frolov, I. The heat conditions of the cold pilger rolling / I. Frolov, I. Mamuzić, V.N. Danchenko // Metalurgija – Sisak then Zagreb. – 2006. – No. 45(3). – P. 179–184.
14. Григоренко, В.У. Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко, А.П. Головченко. – Дніпропетровськ : Пороги. – 2015. – 120 с.
15. Пилипенко, С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия. – 2019. – № 3. – С. 33–35.
16. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ с использованием линий Безье / С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко, И.В. Маркевич // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 3. – С. 28–30.
17. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ и ХПТР с использованием линий Безье при разработке продольного профиля рабочего конуса деформации / С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко // Системные технологии. – 2011. – № 4. – С. 35–40.
18. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Металлургиздат, 1963. – 269 с.
19. Фролов, В.Ф. Холодная пильгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – 260 с.

Поступила 10.06.2020

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SEPARATE CALIBRATION PARAMETERS OF THE WORKING TOOL OF THE COLD ROLLING PIPES MILLS ON THE Q -FACTOR DISTRIBUTION ALONG THE DEFORMATION CONE

S. PILIPENKO

The study is intended to analyze the effect such technological factors of the cold pipe rolling process as the initial conicity and steepness of the mandrel working profile, the fluctuations of wall thickness accuracy, the influence of mandrel repositions on the changing of Q -factor distribution along the deformation cone. The Q -factor value, which is the relationship between real deformation of wall thickness and real deformation of the pipe mean diameter, and its distribution pattern along the deformation cone are controlled values in the proses of rolling pipes from titanium and zirconium alloys of a certain assortment. The Q -factor defines if metal grains will oriented radially or tangentially. It's desirable that Q -factor fluctuate insignificantly about its definite value and deformation cone. It was found that the degree of steepness has a greater effect on the nature of the distribution of the Q -factor along the deformation cone than the initial conicity. The most optimal values of the degree of steepness and initial taper were found (from the point of view of the distribution of the Q -factor and rolling force along the deformation zone).

Keywords: CTR mill, optimal distribution, Q -factor, deformation force, calibration parameters.

УДК 621.91.01/02

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФРЕЗЕРНЫХ И ОСЕВЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

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

Рассмотрены особенности методологии исследования сборных режущих инструментов с использованием 3D-прототипирования, сформулированы цели и задачи исследования. Приведены физические и математические модели формообразования основных конструктивных элементов режущих инструментов с учетом аэрогидродинамического воздействия охлаждающих и смазывающих сред. Даны формулы для расчета геометрических параметров стружко- и теплоотводящих канавок, описаны стенды для изучения аэрогидродинамических процессов при обработке сборными режущими инструментами, влияния теплового воздействия на макеты, усадки и структуры пластикового материала на точность выполняемых размеров режущих инструментов. Представлены рекомендации по совершенствованию конструкций режущих инструментов с использованием гибридных технологий.

Ключевые слова: методология, машиностроение, моделирование, металлорежущий инструмент, 3D-прототипирование, 3D-печать.

Введение. В связи с быстроменяющимися условиями обработки материалов резанием, такими как увеличение скорости резания и введение программного управления процессом резания, требуется корректировка и уточнение методологии исследования кинематических и физических характеристик процесса резания [1]. Эти изменения в исследованиях должны касаться всех аспектов и объектов процесса резания, но наибольшее внимание следует уделить режущим инструментам, составляющим хотя и небольшую долю в себестоимости обработки (порядка 3–5%), но без совершенствования которых невозможно повышение эффективности процесса резания. Как известно, наибольшее применение в производстве находят сборные конструкции режущих инструментов и прежде всего фрезерные, осевые (сверла, зенкеры, развертки) и расточные головки [2].

Широкое использование сборных конструкций режущих инструментов при высокоскоростной обработке сдерживается их сравнительно большими габаритами, аэро- и гидравлическим сопротивлением, инерционностью масс конструктивных элементов и, как следствие, падением мощности и производительности резания.

Анализ разработок и результатов исследований сборных режущих инструментов, выполненных ведущими инструментальными фирмами: Sandvik Coromant (Швеция), Iskar (Израиль), Hermle (Германия), Korloy (Южная Корея), Mitsubishi (Япония), и известными учеными В.А. Гречишниковым, В.Ф. Бобровым, Г.И. Грановским, М.И. Михайловым и другими, показывает, что многие вопросы в области оптимизации и автоматизации проектирования и изготовления сборных модульных конструкций режущих инструментов решены. Однако недостаточно внимания уделяется оптимизации формы и геометрических параметров модульных инструментов, технологий их изготовления с учетом условий обтекания воздушными и гидравлическими потоками и обеспечения стружко- и теплоотведения, статической и динамической балансировки в процессе высокоскоростного резания. Хотя в смежных областях техники, например, самолето- и кораблестроении, эти вопросы исследованы достаточно полно с представлением физических и математических моделей [3].

При изготовлении сборных режущих инструментов используются различные методы, в частности обработка давлением и резанием, методы порошковой металлургии и 3D-печати. Для каждого из этих методов требуется проектирование такой конструкции режущего инструмента, которая бы учитывала функциональное назначение режущего инструмента, например, для высокоскоростного фрезерования или растачивания, и особенности технологий его изготовления (обработки и сборки).

Не в полной мере используются возможности «гибридных» технологий, предусматривающих 3D-печать модульных деталей и узлов и их сборку традиционными методами, применение высокопрочных композиционных полимерных материалов, алюминиевых и титановых сплавов для уменьшения веса корпусных деталей и традиционных металлических (легирующих сталей, твердых сплавов) для режущих вставок (блоков).

Требуются современные конструкторско-технологические решения по улучшению аэро- и гидродинамических свойств режущих инструментов за счет применения рациональной формы корпусов и расположения составляющих конструктивных элементов (режущих лезвий, стружко- и теплоотводящих канавок) и использования балансировочных механизмов.

Решение этой технически сложной задачи возможно при комплексном подходе к проектированию, предусматривающем математическое моделирование 3D-конструкции, макетирование (изготовление) экспериментального образца с использованием трехмерных технологий, физическое моделирование условий резания материала макетом режущего инструмента и оптимизацию параметров режущего инструмента, выработку рекомендаций по рациональной технологии изготовления сборного режущего инструмента, что в конечном итоге обеспечит сокращение временных и финансовых затрат на подготовку производства сборных режущих инструментов.

Основная часть. Целью данной работы является совершенствование конструкций сборных режущих инструментов и сокращение времени на подготовку их производства за счет 3D-макетирования и моделирования аэрогидродинамических и тепловых условий эксплуатации.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- на основе анализа сборных режущих инструментов и условий их эксплуатации при высокоскоростном резании установить основные пути совершенствования их конструкций за счет улучшения аэрогидродинамической формы корпусов и стружко- и теплоотводящих канавок;
- разработать математические и физические 3D-модели, описывающие параметры форм конструктивных элементов режущих инструментов с учетом условий обтекаемости и рационального стружкоотвода и балансирования;
- разработать методику экспериментального исследования 3D-макетов режущих инструментов, в т.ч. параметров их аэрогидродинамики и балансирования;
- установить зависимости параметров конструктивных элементов режущих инструментов от аэрогидродинамической и тепловой нагрузок при различных скоростях и мощности резания;
- пронормировать подготовку производства сборных режущих инструментов при их проектировании и изготовлении с использованием традиционных технологий, 3D-макетирования и «гибридного» метода;
- выработать рекомендации по совершенствованию сборных режущих инструментов и сокращению времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства.

В основу современной методологии исследований процесса резания и режущих инструментов положено математическое и физическое моделирование изменений их основных характеристик и параметров в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации [1].

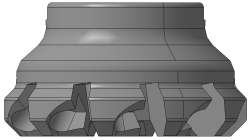
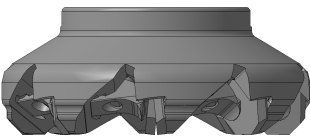
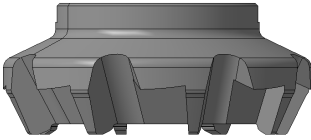
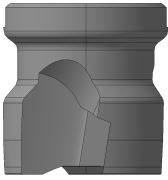
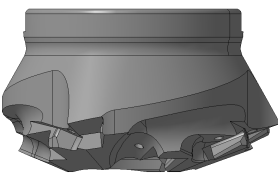
Математическое моделирование включает описание известными формулами наиболее распространенных форм корпусов режущих инструментов в виде дисков, цилиндров, конусов, торов и т.п., некоторые из которых представлены в таблице 1.

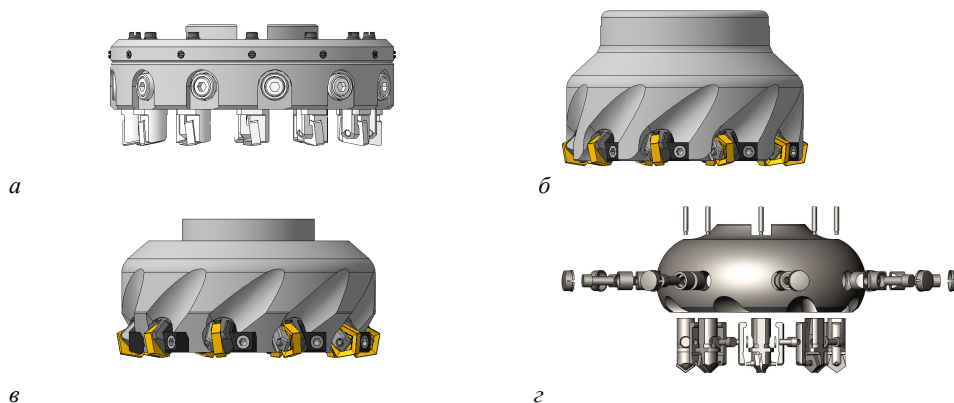
По аналогии предложены макеты конструкций в виде сочетания цилиндров (рисунок 1, а), дисков (рисунок 1, б), усеченных конусов (рисунок 1, в) и двух сопрягаемых торов (рисунок 1, г).

В настоящее время исследования в области аэрогидродинамических характеристик режущих инструментов в вязкожидкостной среде при высокоскоростной обработке исследованы недостаточно. Поэтому наряду с результатами исследований резания для изучения особенностей обтекания корпусов режущих инструментов можно воспользоваться моделированием летающих объектов, имеющих вращение [3]. Прежде всего на аэродинамические характеристики тел вращения влияют такие факторы, как шероховатость, геометрическая форма, площадь миделя, материал, положение обтекаемого тела относительно набегающего потока.

В зависимости от формы тела возможны различные случаи их обтекания воздушными потоками и влияния потоков на аэродинамические характеристики тел (рисунок 2).

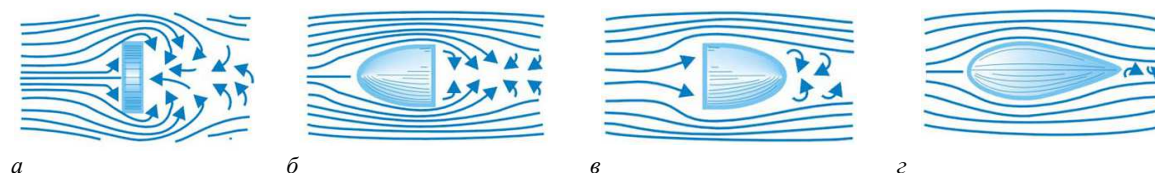
Таблица 1. – Конструктивные формы торцовых фрез

		
<i>F45WG D080-10-27-FX-R08</i>	<i>SOF45WG D125-08-40-R26</i>	<i>T465 FLN D125-08-40R-22ST</i>
		
<i>HM90 F90A D 40-3-16</i>	<i>T425 SM-D050-13-3-32-13</i>	



а – в виде сочетаний цилиндров; б – дисков; в – усеченных конусов; г – сопрягаемых торов

Рисунок 1. – Макеты конструкций

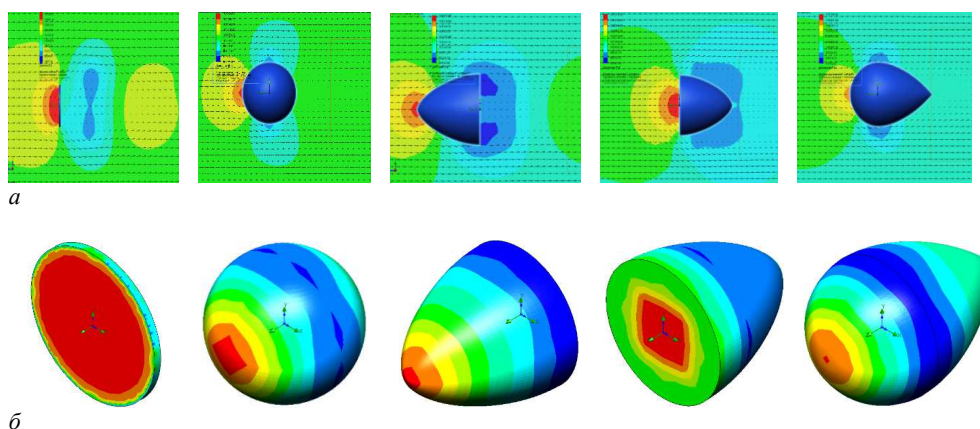


**а – круглая пластина; б – пластина с носовым обтекателем;
в – пластина с хвостовым обтекателем; г – каплевидное тело**

Рисунок 2. – Влияние формы тела на аэродинамические характеристики

Предложены трехмерные твердотельные модели пяти разных по форме тел вращения, но с одинаковой площадью миделевого сечения в Solid Works Simulation, обдуваемых воздушными потоками. Результаты моделирования представлены на рисунке 3. Миделевое сечение у всех тел – это круг диаметром 100 мм.

Зона распределения воздушных потоков для круглой пластины формируется и концентрируется по всей площади, перпендикулярной лобовому сопротивлению (рисунок 3, а). Красная зона полностью отражает граничные условия распределения потоков для плоского тела вращения. Сферическое тело вращения, пластина с носовым обтекателем, а также каплевидное тело имеют воздействие на поверхностях в зонах контакта, однако за счет параметров, близких к идеальной геометрической форме «сфера», зоны концентрации распределяются по наружному контуру и сопротивление воздушным потокам сглаживается (рисунок 3, б).



**а – изображение в сечениях для правой плоскости;
б – изображение на поверхности, показывающие распределение давления**

Рисунок 3. – Результаты моделирования

Сила лобового сопротивления, действующая на тело, сравнивается с теоретическими данными. При этом сила сопротивления круглой пластины принимается за единицу. Следует отметить, что программное приложение Solid Works Simulation демонстрирует свой функционал и возможности моделирования различного рода симуляций процессов на примере несложных тел вращения. В дальнейшем возможно его применение при моделировании форм блочно-модульного режущего инструмента. Например, обтекание тороидального корпуса фрезы жидкостными или воздушными потоками может быть представлено аналогично рисунку 2, б, г в виде схемы на рисунке 4, а, а лобовое сопротивление режущей пластины в резовом блоке по аналогии с рисунком 2, а и в – в виде рисунка 4, б. В разработанных конструкциях режущих инструментов учитываются ранее предложенные рекомендации по аэрогидродинамическим характеристикам обтекаемости тел.

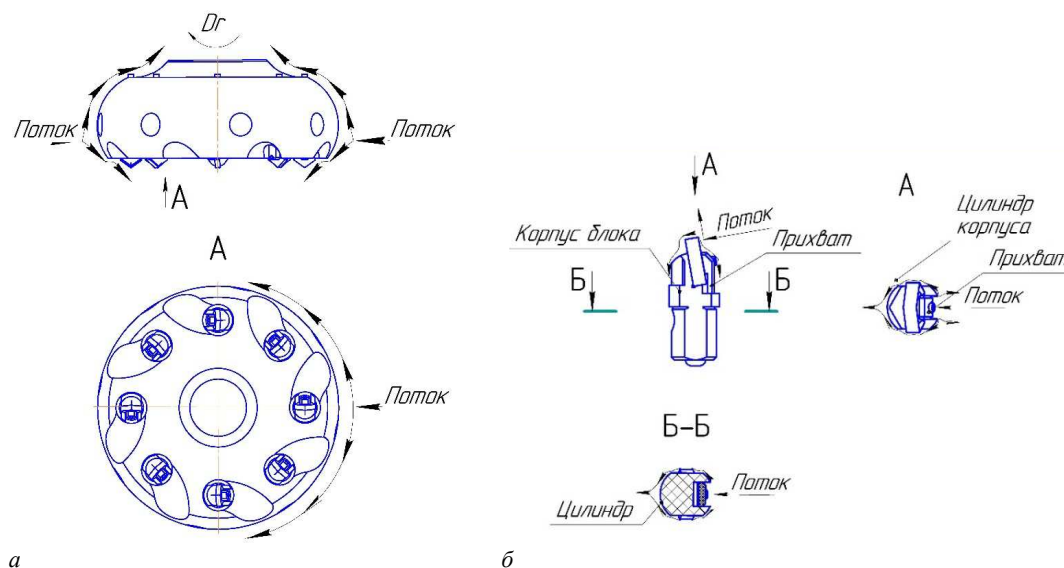


Рисунок 4. – Схемы обтекания воздушными и жидкими потоками корпусов (а) и конструктивных элементов резовых блоков (б)

Одним из важнейших конструктивных элементов режущих инструментов является стружкоотводящая канавка. В случае высокоскоростной обработки ее можно назвать и теплоотводящей, т.к. 75–95% образующейся теплоты отводится из зоны резания стружкой. Здесь важно максимально учесть однонаправленность стружки и потока жидкости или воздуха, способствующих теплоотведению. Имеются аналогичные резанию физические модели обтекания вращающихся тел, например, ротационный вертушки (рисунок 5, а), завихрения воздушных потоков в закрытых полостях (рисунок 5, б), которые могут быть применимы и для наших случаев [4].

Для определения формы и расположения стружкоотводящих канавок можно воспользоваться рекомендациями исследований процесса резания.

Как известно, тангенс угла схода стружки рассчитывается по формуле [5]

$$\operatorname{tg}\eta_{ci} = \operatorname{tg}\lambda_i \cdot \cos\gamma_i, \quad (1)$$

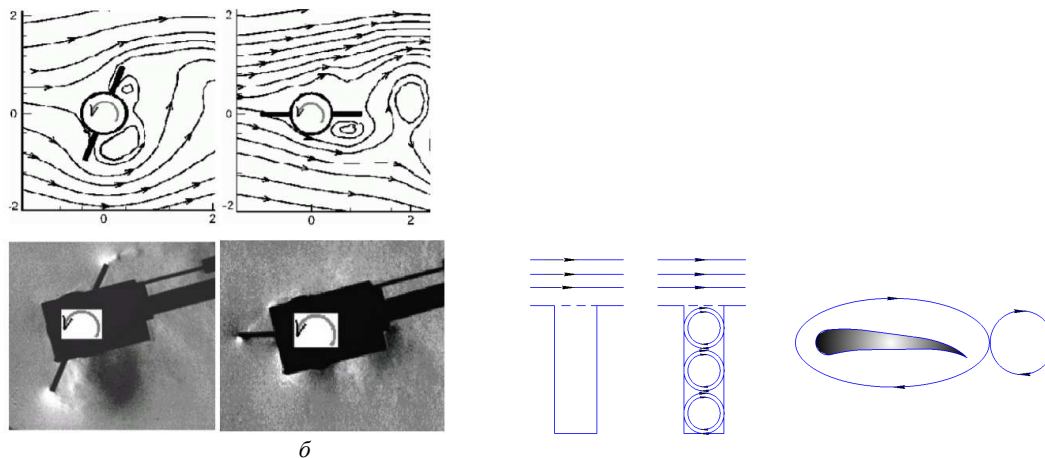
где λ_i и γ_i – угол наклона режущей кромки и передний угол лезвия, и с учетом радиуса при вершине режущей пластины по формуле [5]

$$\eta_c = \eta'_c + \eta_{ck} = \eta - \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\vartheta_{1c}}{\vartheta_{1c}} \right) + \eta_{ck}, \quad (2)$$

где η_c – угол схода стружки;

$\vartheta_{1c}(x)$ и $\vartheta_{2c}(y)$ – проекции вектора скорости схода стружки на координатные оси x и y ;

η_{ck} – угол, учитывающий изменение направления движения стружки под действием сил на передней поверхности лезвия инструмента.



a – ротационная вертушка; *б* – завихрения воздушных потоков в закрытых полостях

Рисунок 5. – Физические модели обтекания вращающихся тел

С другой стороны, из гидродинамики известна формула Ньютона, связывающая размеры препятствия и усилие, создаваемое обтекающей жидкостью или газом [3]:

$$\partial Y = \frac{\mu \cdot \partial W \cdot S}{F}, \tag{3}$$

- где Y – координата по нормали к линейной скорости вращающегося объекта;
- μ – коэффициент динамической вязкости среды;
- W – скорость среды;
- S – площадь препятствия;
- F – сила взаимодействия.

Схемы для определения угла схода стружки и координаты Y представлены на рисунке 6.

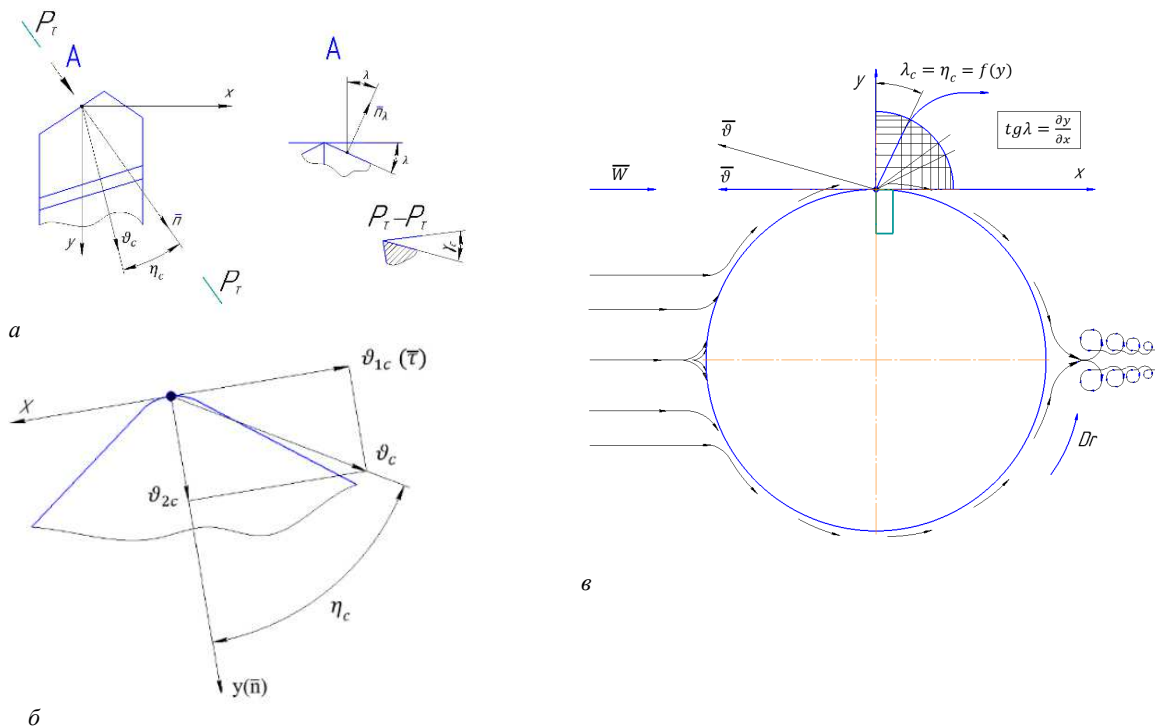


Рисунок 6. – Схемы для определения угла схода стружки (*a*), с учетом скорости схода стружки (*б*) и обтекания воздушно-жидким потоком (*в*)

Совместное решение уравнений (1)–(3) позволяет определить значение угла схода стружкоотводящей канавки, учитывающей условия резания и обтекания режущей пластины потоком жидкости или газа.

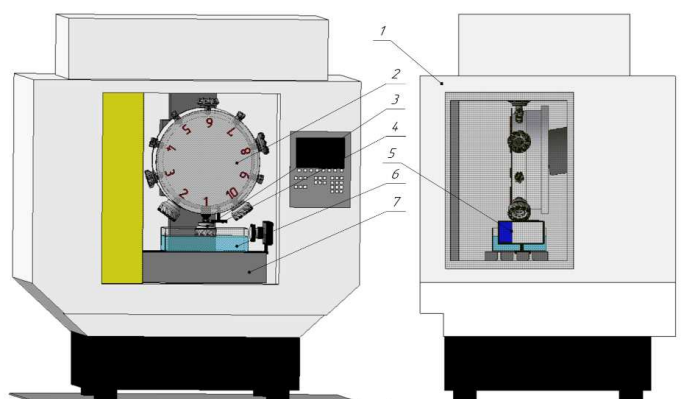
Физическое моделирование блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) и их работоспособности заключалось в 3D-печати макетов и их исследовании на экспериментальных стендах [7].

Проектирование и усовершенствование конструкций блочно-модульного режущего инструмента как сложного изделия машиностроения осуществляется путем формирования трехмерной модели инструмента, т.к. именно создание трехмерных моделей, идентичных проектируемым конструкциям БМРИ, позволяет быстро перенастраивать инструмента для реализации целей исследования. Использование 3D-параметрических моделей типовых деталей конструкции дает возможность существенно повысить эффективность конструирования в среде САД-систем [4]. Однако на этапах подготовки трехмерных моделей к печати следует оценивать технические характеристики используемых 3D-принтеров и материалов с последующей корректировкой геометрических размеров, оказывающих влияние на точность печати трехмерных экспериментальных макетов БМРИ. Были напечатаны макеты, представленные на рисунке 7.



Рисунок 7. – Макеты конструкций блочно-модульных торцовых фрез, расточного патрона и основных элементов, выполненных с применением технологии трехмерной печати

Физическое моделирование работоспособности БМРИ реализовывалось на фрезерном станке с ЧПУ модели «Robodrill» (фирма «Fanuc», Япония). Использовались макеты сборных режущих инструментов, отпечатанных на 3D-принтерах из различных пластиковых материалов. Макеты устанавливались в инструментальном магазине станка и погружались в емкость с подкрашенной жидкостью (рисунок 8).



1 – вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Robodrill a-D21LiB; **2** – магазин станка;
3 – блочно-модульная торцовая фреза; **4** – камера Huawei P20 Pro; **5** – зеркальный фотоаппарат Canon 1200D;
6 – емкость с жидкостью; **7** – стол станка

Рисунок 8. – Физическая модель для исследования работоспособности конструкции БМРИ

При моделировании регулировалась частота вращения инструмента и велась видеосъемка потоков жидкости, обтекающих конструктивные элементы режущих инструментов.

Моделирование балансирования. Разработана модель балансировочного механизма в виде двух колец со спиральными пазами. Особенностью конструкции двух балансировочных колец является возможность изменения корректирующей массы в противофазе дисбалансу БМРИ, добавленной за счет перемещения груза (шарика) определенной массы в пазу по спирали Архимеда [9]. Макет БМРИ с устройством балансирования представлен на рисунке 9.

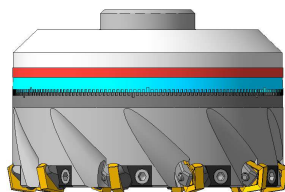


Рисунок 9. – Макет блочно-модульного режущего инструмента с устройством балансирования

Модель теплового воздействия. Целью моделирования процесса нагрева макета блочно-модульного режущего инструмента являлась качественная оценка тепловых деформаций основных конструктивных элементов (в пределах текучести пластика) и выработка рекомендаций по корректировке (совершенствованию) рабочих чертежей. Наглядное представление об изменениях винта в процессе нагрева представлено на рисунке 10. Время температурного воздействия на винт занимает 3 с.

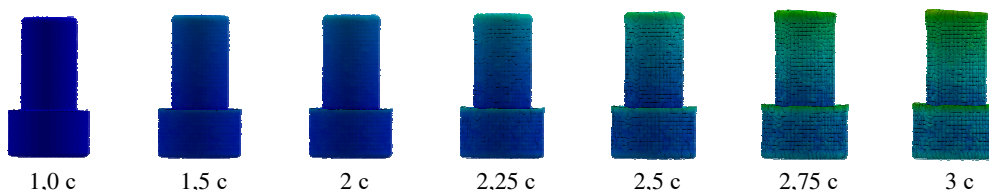


Рисунок 10. – Схема наглядного представления изменений винта в процесс нагрева

Изменения в процессе нагрева модуля блока резцового наглядно представлены на рисунке 11.

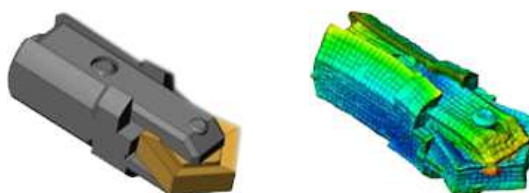


Рисунок 11. – Схема изменений в процессе нагрева блока резцового

Время температурного воздействия на корпус блока резцового и корпуса фрезы занимает 5 с, наглядное изменение корпуса блока резцового в процессе нагрева представлено на рисунке 12, корпуса фрезы – на рисунке 13.

В результате моделирования тепловых деформаций можно отметить следующее:

1. При нагреве крепежного винта он удлиняется, что необходимо учитывать при проектировании резьбового соединения.
2. Режущая пластина увеличивается в «диаметральном» размере, что необходимо учитывать при определении размера паза для ее размещения.
3. Корпус блока резцового увеличивается в размерах, наибольшей тепловой деформации подвергаются боковые стенки продольного паза для размещения прихвата, что необходимо учитывать при назначении допусков на ширину паза и прихвата.
4. Тепловые деформации отдельных конструктивных элементов блока резцового сказываются на общей деформации блока резцового в сборе – режущая пластина «врастает» в корпус и прихват, размеры прихвата изменяются по высоте, ширине и длине, деформируется форма отверстия под штифт, увеличивается диаметр штифта и диаметр винта зажимного. Эти тепловые деформации должны быть учтены при размерном анализе сборки резцового блока.

5. Качественные изменения тепловых деформаций торцевой фрезы свидетельствуют о максимальных их значениях в режущей пластине и блоке резцовом, однако ими нельзя пренебрегать и при проектировании корпуса фрезы, особенно в части торцевой шпонки, с помощью которой фреза закрепляется в хвостовике.

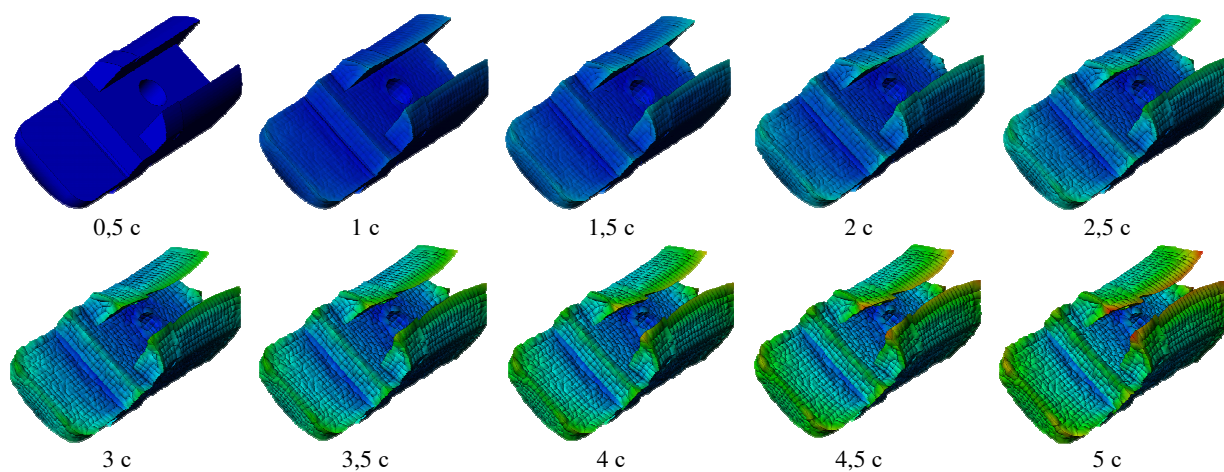


Рисунок 12. – Схема наглядного представления изменений в процессе нагрева корпуса блока резцового

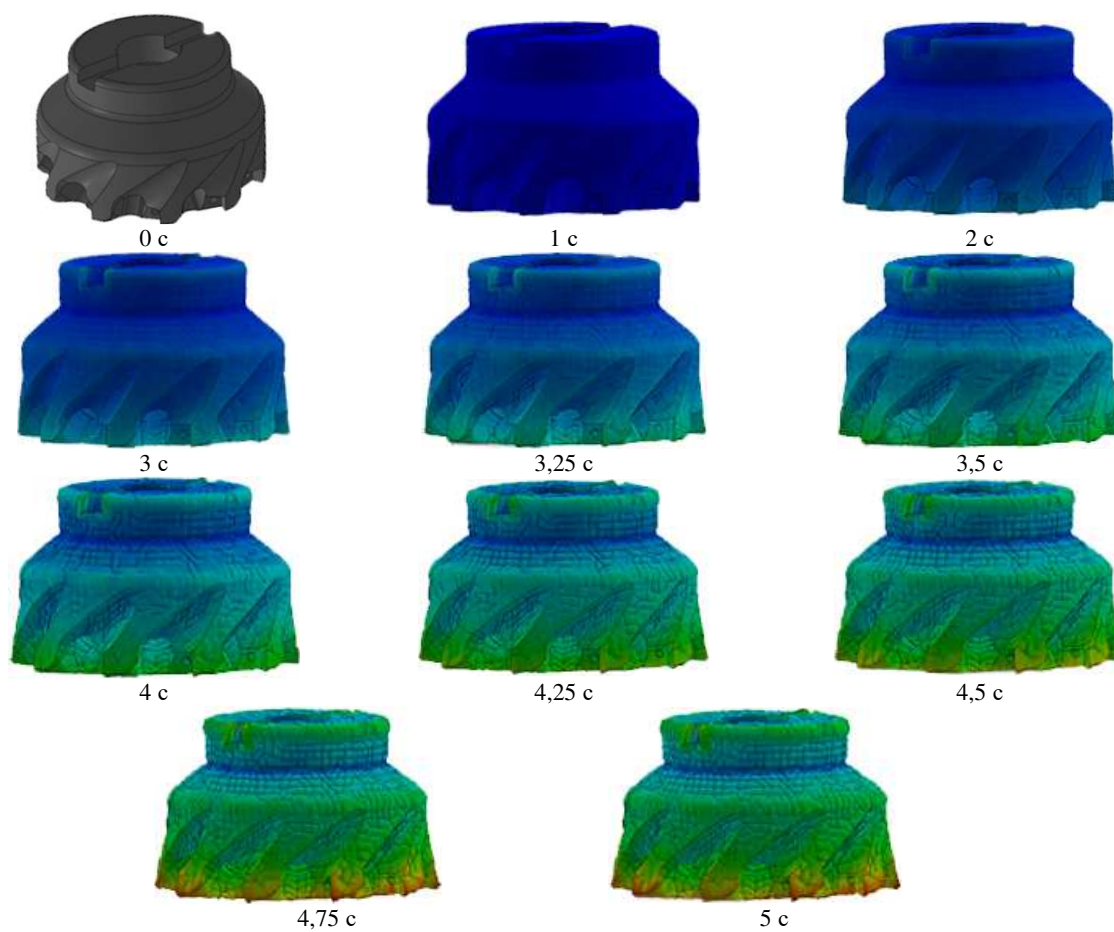


Рисунок 13. – Схема наглядного представления изменений в процесс нагрева корпуса фрезы

Моделирование изменений точностных параметров БМПИ за счет усадки материалов. При изготовлении макетов режущих инструментов с использованием 3D-технологий оценивалось соответствие получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будет зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов [9].

На рисунке 14 представлена схема измерения геометрических параметров формообразующего геометрического профиля режущего инструмента и структура наружной поверхности на примере блочно-модульных торцовых фрез, где указанные позиции 1–9 отображают последовательность измерений с периодичностью в 10 точек с вычислением среднего значения размера в каждой из них с использованием видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU.

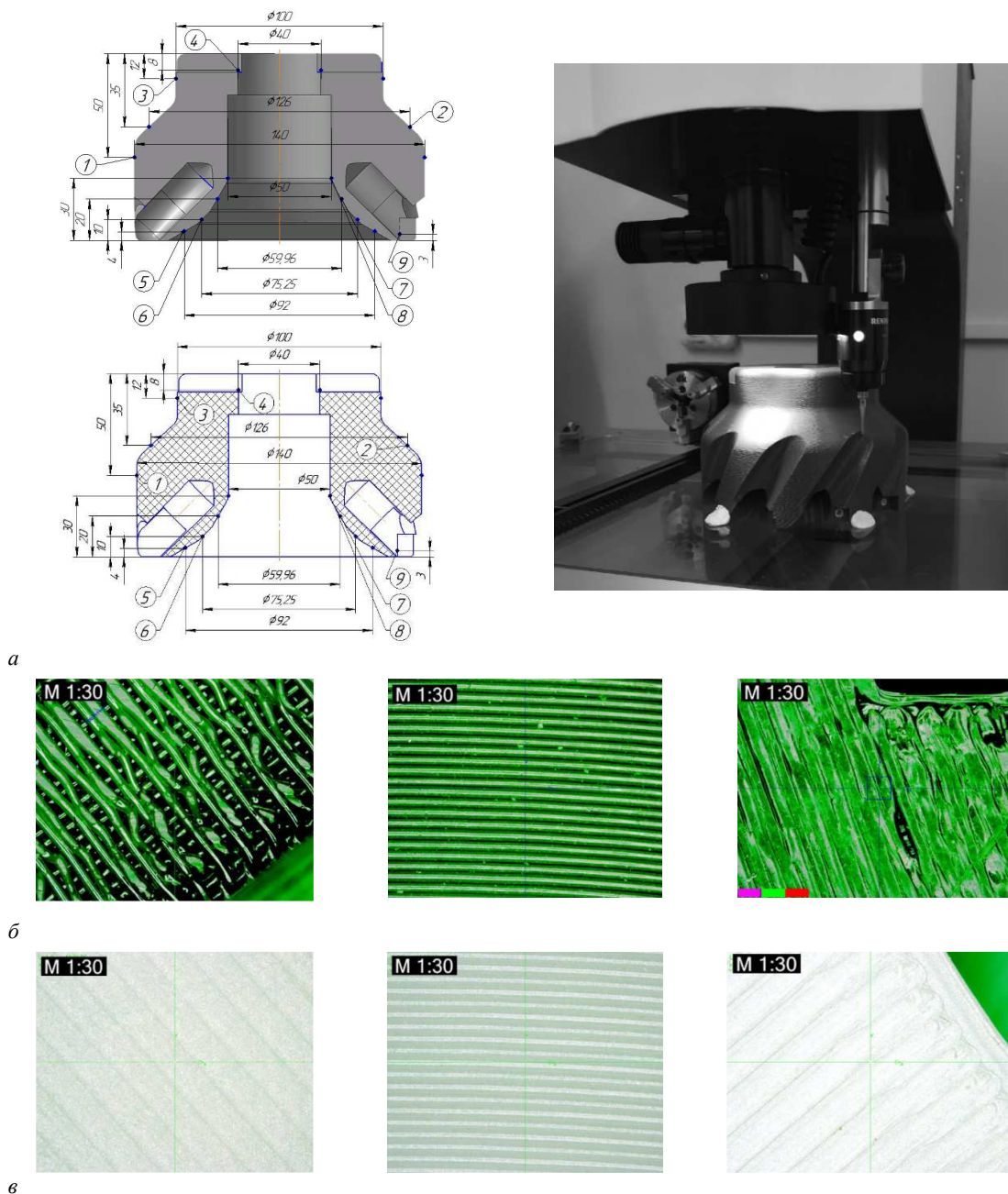


Рисунок 14. – Эскиз БМПИ и экспериментальная установка измерения его геометрических параметров (а) и структура наружных поверхностей, напечатанных: б – из пластика ABSplus-P430 на 3D принтере Stratasys Mojo; в – из PLA-пластика Wanhao на 3D принтере Mass Portal Pharaoh XD 30

Изучение структуры и шероховатости поверхностного слоя деталей показывает, что плоское наложение слоев материала и их пересечение различно для рассматриваемых способов и степени заливки материалов: для 100% – 6,3 мкм, для 50% – 6,8 мкм.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных или нерабочих размеров поверхности и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D-принтерами, достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцевой шпонки, отверстий для установки блоков резовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити, обработка технологии 3D-печати.

Оценка затрат при использовании различных технологий производств БМРИ. Как показали эксперименты и расчеты, затраты на изготовление макетов традиционным, аддитивным и гибридным методами значительно отличаются, что отражает экономический эффект (таблица 2).

Таблица 2. – Оценка затрат на изготовление БМРИ различными методами

Метод изготовления	Традиционный	Аддитивный	Гибридный
Стоимость, руб.	≈ 1000	≈ 350	≈ 720

Применение «гибридного» метода изготовления макета блочно-модульного режущего инструмента из полимерного материала позволяет сэкономить средства, а также сократить время на конструкторскую и технологическую подготовку производства по сравнению с традиционным методом. Однако этот метод уступает аддитивному методу, для которого нет необходимости в дорогостоящей технологической оснастке, инструментах, большом количестве металлообрабатывающего оборудования, и который, кроме того, позволяет отработать каждый элемент конструкции БМРИ на стадии проектирования [11; 12].

Заключение. Разработанные методики и модели дают возможность проводить комплексные исследования работоспособности сборных режущих инструментов, в частности оценивать целесообразность принимаемых технических решений по совершенствованию конструкций фрезерных и осевых инструментов, таких как:

- использование обтекаемых корпусов в виде двух сопрягаемых торцов;
- выполнение стружкоотводящих канавок, учитывающих направления схода стружки и потока охлаждающей жидкости или воздуха;
- введение в конструкцию балансирующих механизмов в виде уравновешивающих грузов и дисков с кольцевыми и спиральными канавками;
- повышение точности и качества получаемых конструктивных элементов и поверхностей с учетом теплового расширения и усадки полимерного материала;
- применение «гибридных» конструкций сборных режущих инструментов и технологий их изготовления, включающих пластиковые корпуса из высокопрочных полимеров и металлические резовые вставки с механизмами зажима;
- оценки экономической эффективности традиционных, аддитивных и гибридных конструкций и технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Методология и исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 21–30.
2. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 19–37.
3. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы / С.М. Белоцерковский [и др.]. – М.: Центр. аэродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского, 2000. – 260 с.
4. Андронов, П.Р. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок / П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 184 с.
5. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.
6. Грубый, С.В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов / С.В. Грубый // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2017. – С. 4–15.
7. Портянко, С.А. Технологии FDM печати конструкции блочно-модульной торцевой фрезы / С.А. Портянко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2019 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 38.
8. Попок, Н.Н. 3D-моделирование конструкций блочно-модульных торцевых фрез [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, иннова-

- ции (ИКТ-2018) : электрон. сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – С. 190–192.
9. Попок, Н.Н. 3D-макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : материалы 34-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 марта 2019 г. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 97–98.
10. Оценка параметров точности и шероховатости поверхностей деталей блочно-модульного режущего инструмента, полученных 3D-печатью / Н.Н. Попок [и др.] // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : материалы 35-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 12–13.
11. Попок, Н.Н. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии в машиностроении (ИнТехМаш-2020) : электрон. сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2020. – С. 40–41.
12. Попок, Н.Н. Автоматизация подготовки производства на основе 3D-макетирования технологической оснастки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 марта 2020 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; ЗАО «МинскЭкспо». – Минск : БНТУ, 2020. – С. 100.

Поступила 10.06.2020

METHODOLOGY FOR STUDYING THE PERFORMANCE OF AXIAL MILLING AND CUTTING TOOLS BASED ON 3D-PROTOTYPING

N. POPOK, S. PORTSIANKO

The features of the research methodology for precast cutting tools using 3D prototyping are considered, and the goals and objectives of the research are formulated. Physical and mathematical models of forming the main structural elements of cutting tools are given, taking into account the aero-hydrodynamic effect of cooling and lubricating media. Formulas for calculating the geometric parameters of chip and heat-removing grooves are given, stands for studying aero-hydrodynamic processes during processing with precast cutting tools are described, the influence of heat on layouts, shrinkage and structure of plastic material on the accuracy of the sizes of cutting tools are given, recommendations for improving the design of cutting tools using hybrid technologies are given.

Keywords: *methodology, mechanical engineering, modeling, metal-cutting tools, 3D-prototyping, 3D-printing.*

УДК 621.793.7.001.5

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ДИСКРЕТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРНА***канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет),**канд. техн. наук В.Н. ЛОПАТА, канд. техн. наук В.И. КАЛИНИЧЕНКО**(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев),**А.В. ЛОПАТА (Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского),**канд. техн. наук, доц. Т.И. ИВЧЕНКО**(Херсонская государственная морская академия, Украина),**А.П. ГРИЩЕНКО**(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)*

Рассмотрено влияние рабочей поверхности дробящих элементов с покрытием дискретной структуры, имеющим рельеф в виде полусфер, расположенных на плоскости, на разрушение и измельчение зернового сырья при его свободном ударе. Показано, что рабочая поверхность таких дробящих элементов, не уступая плоскости при прямом ударе, может быть много эффективнее при измельчении зернового сырья, если увеличивать угол падения зерна. Приводятся теоретическое обоснование и результаты экспериментов при измельчении зерна пшеницы дробящими элементами с рабочей поверхностью с покрытиями дискретной структуры.

Ключевые слова: *покрытия дискретной структуры, измельчение, зерно, твердость, износостойкость, рабочая поверхность, рикошеты дробящих элементов.*

Введение. В перерабатывающей промышленности при измельчения зернового сырья в дробилках ударного действия происходит соударение свободно движущихся частиц с твердой поверхностью. При этом процесс измельчения во многом зависит от того, насколько эффективно используется энергия удара на разрушение. Наиболее целесообразен удар, близкий к прямому, т.е. когда вектор относительной скорости частицы направлен по нормали к дробящей поверхности.

В первом приближении эту задачу решают исходя из условий движения сырья при подаче его в рабочую зону и кинематики рабочих органов. Однако полностью реализовать условия прямого удара во всем микрообъеме рабочей зоны не удастся. Это связано с формой рабочих органов, которая меняется из-за изнашивания в процессе эксплуатации. Тем более не удастся предусмотреть последствия рикошетов и повторных ударов.

В этой связи представляет интерес возможность повышения эффективности разрушения зерна за счет использования регулярного рельефа рабочей поверхности в виде покрытий дискретной структуры. При этом повышение эффективности разрушения и измельчения зерна обеспечивается как за счет повышения износостойкости рабочих поверхностей дробящих элементов для переработки зерновых культур [1], так и оптимизацией геометрических параметров рельефа их поверхности.

Основная часть. Результаты экспериментов по измельчению зерна при ударе о плоскую поверхность показали, что эффективность его разрушения существенно зависит от угла падения. На рисунке 1 представлена такая зависимость для зерна пшеницы и кукурузы.

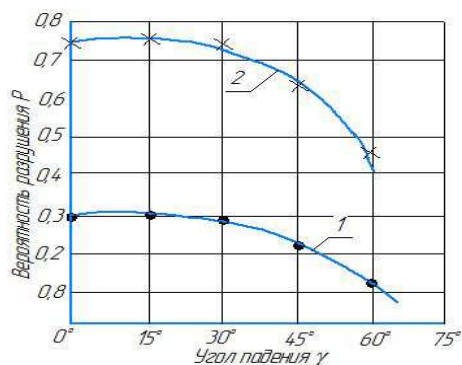
В качестве меры эффективности разрушения использована весовая доля раздробившихся зерен. В случае узкого исходного фракционного состава зерна, что и обеспечивалось в эксперименте, весовую долю можно трактовать как вероятность разрушения (Φ).

Скорость удара составляла 50 м/с для кукурузы и 60 м/с для пшеницы. Как видно из графиков, эффективность разрушения начинает падать при углах падения β , больших $\pi/4$. Если направление вектора скорости частицы при подлете к рабочей поверхности случайно, а скорее всего именно это и имеет место в дробилках, тем более после первого удара, то большая часть частиц находится не в оптимальных условиях соударения.

Рассмотрим возможность оптимизации этих условий за счет формирования регулярного рельефа на рабочих поверхностях. Положим, что частицы в дробилке образуют стационарное пуассоновское поле [2], т.е. обладают свойствами:

1) вероятность попадания некоторого числа точек в любую область пространства не зависит от того, сколько их попало в любую область, не пересекающуюся с данной;

2) вероятность попадания в элементарную область $\Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z$ двух и более точек пренебрежимо мала по сравнению с попаданием одной точки.



1 – пшеница (скорость удара 60 м/с); 2 – кукуруза (скорость удара 50 м/с)

Рисунок 1. – Вероятность разрушения зерна в зависимости от угла падения на плоскость

Вектор скорости частиц (\vec{V}) – величина случайная по направлению с плотностью распределения $j(\vec{V})$. За время dt из частиц, имеющих величину скорости V , поверхности dS достигнут только те, которые находятся в объеме [3]:

$$dQ = V \cdot \cos \beta \cdot dS \cdot dt, \quad (1)$$

где β – угол между нормалью к поверхности dS и вектором скорости V .

Всего частиц, достигших поверхности в единицу времени, будет

$$N = \lambda \int_D V \cos \beta \cdot f(\vec{V}) \cdot d\vec{V} \cdot dS, \quad (2)$$

где λ – среднее число частиц в единице объема;
 D – область интегрирования по переменным.

Из них разрушатся

$$n = \lambda \int_D \psi(v, \beta, \rho, c) \cdot v \cdot \cos \beta \cdot f(\vec{V}) \cdot d\vec{V} \cdot dS, \quad (3)$$

где $\psi(v, \beta, \rho, c)$ – весовая функция, характеризующая эффективность разрушения частиц, которая в общем случае может зависеть от скорости удара v , локального угла падения β , радиуса кривизны ρ в точке удара, возможности повторного удара c в случае рикошета.

Таким образом, доля разрушения зерен в единицу времени в условиях стационарного поля частиц определяется из соотношения

$$P = \frac{n}{N}. \quad (4)$$

Выражение (4) может служить мерой эффективности заданного рельефа.

В условиях неопределенности функции $j(\vec{V})$ естественно считать ее равномерной по всем направлениям, что позволяет, в силу симметрии, предполагать эффективность использования в качестве элемента рельефа полусферу.

Для модельных исследований рассмотрим конструкцию поверхности с покрытием дискретной структуры, наносимым в виде отдельных участков (рисунок 2). Форма отдельного участка – полусфера. С целью повышения износостойкости материал полусферы должен иметь твердость, намного превышающую твердость основного материала. Сочетание вязкости основного материала и высокой твердости участков покрытия обеспечивает долговечность дробящих элементов.

Конструкция поверхности с дискретным покрытием в этом случае характеризуется радиусом полусфер R и шагом T (расстоянием между центрами оснований полусфер на плоскости).

В первом приближении эффективность такой поверхности будет равна

$$P = (1 - M) \cdot \Phi + MP_1, \quad (5)$$

где $M = \frac{\pi R^2}{T^2}$ – относительная часть плоскости, занятая основаниями полусфер;
 Φ – вероятность разрушения частицы на плоскости (определяется из эксперимента);
 P_1 – вероятность разрушения частиц на полусфере.

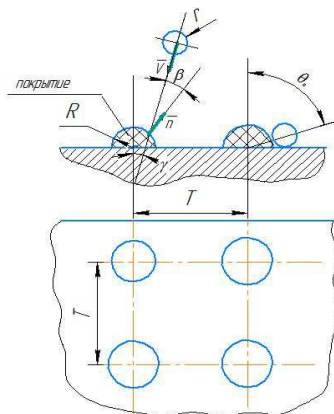


Рисунок 2. – Модель поверхности с дискретным покрытием

Выражение (4) в случае детерминированного потока частиц под углом γ к плоскости (см. рисунок 2) для полусферы принимает вид

$$P_1 = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_0} \delta[\varphi + c(1 + \varphi)] \cdot (\sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma + \cos \theta \cdot \cos \gamma) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_0} \delta(\sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma + \cos \theta \cdot \cos \gamma) \sin \theta d\theta}, \quad (6)$$

где θ, φ – широта и долгота сферической системы координат;
 θ_0 – верхний предел интегрирования по широте;
 δ – параметр, определяющий условие физического контакта при численном интегрировании ($\delta = 0$, если $\cos \beta < 0$, и δ , если $\cos \beta \geq 0$);
 c – коэффициент, учитывающий рикошеты и «остаточную» прочность частицы.

Предполагается, что все неразрушившиеся (рикошетировавшие) частицы, имеющие вектор скорости с направлением $\gamma_1 \geq \frac{\pi}{2}$, будут испытывать повторный удар и разрушаться с вероятностью c .

Экспериментальная оценка эффективности модельных поверхностей проводилась на установке, описанной в работе [4].

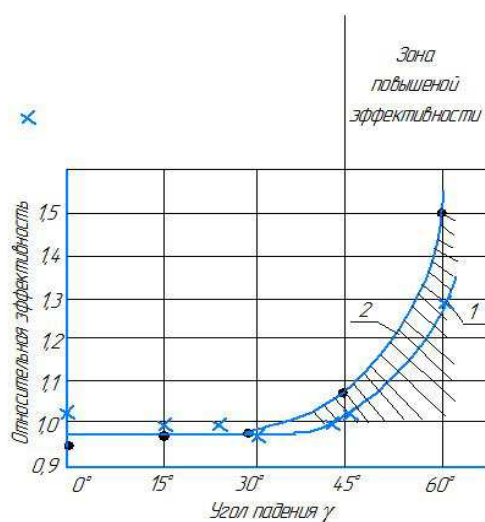
Для случая дробления пшеницы со средним радиусом $r = 2$ мм о модельную поверхность с параметрами $R = 2$ мм, $T = 8$ мм и $T = 6$ мм при различных углах падения результаты эксперимента показаны на рисунке 3. Данные представлены в относительных величинах (к плоскости).

На рисунке 4 наряду с экспериментальными точками на график нанесена теоретическая кривая, полученная расчетом по выражениям (5) и (6). Коэффициент c принимался равным 0,4, что в среднем соответствует экспериментальным данным по повторному дроблению. Как видно, теоретическая кривая не только качественно, но и количественно достаточно хорошо описывает результаты эксперимента.

Влияние конструктивных параметров дискретных покрытий на рабочих поверхностях дробящих элементов на эффективность измельчения видно из рисунка 5, где представлена экспериментальная зависимость вероятности разрушения при угле падения $\gamma = \frac{\pi}{3}$ от величины M – относительной части плоскости, занятой основаниями полусфер.

Кроме модельных поверхностей с геометрическими параметрами, указанными выше, здесь же приводятся данные по испытанию рельефа с $R = 8$ мм и $T = 12$ мм.

Из графиков следует, что по эффективности измельчения рельеф в виде полусфер, расположенных на плоскости, не уступает, а при углах падения потока к плоскости, больших $\frac{\pi}{6}$, и превосходит плоскую поверхность. Эффективность подобной поверхности тем больше, чем большая часть плоскости занята основаниями полусфер и чем больше угол падения потока.



1 – $K=2$ мм, $T=8$ мм; 2 – $P=2$ мм, $T=6$ мм

Рисунок 3. – Относительная эффективность модельных поверхностей в зависимости от угла падения (пшеница, скорость удара 60 м/с)

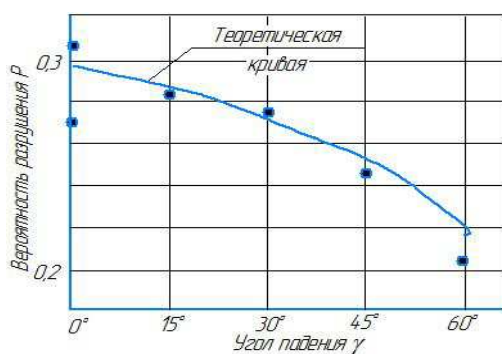


Рисунок 4. – Теоретическая и экспериментальная зависимость эффективности разрушения пшеницы при $V=60$ м/с на модельной поверхности $R=2$ мм, $T=6$ мм

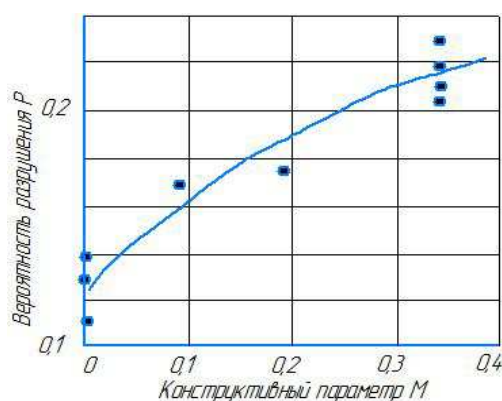


Рисунок 5. – Влияние конструктивного параметра M на эффективность разрушения пшеницы при $V=60$ м/с и угле падения $\gamma = \frac{\pi}{3}$

В общем случае можно поставить задачу по оптимизации рельефа рабочих поверхностей дробящих элементов по критерию вероятности разрушения частиц при заданных статистических характеристиках их поля скоростей и функции вероятности разрушения в соответствии с выражением (4).

Таким образом, рельефная поверхность рабочих поверхностей дробящих элементов в виде покрытий дискретной структуры повышает эффективность дробления зернового сырья.

Заключение. Показано, что рабочая поверхность дробящих элементов с покрытием дискретной структуры и с рельефом в виде полусфер может быть намного эффективнее при измельчении зернового сырья при увеличении угла падения зерна. При этом с целью повышения износостойкости рабочих поверхностей дробящих элементов материал дискретного покрытия должен иметь твердость, намного превышающую твердость основного материала. Сочетание вязкости основного материала и высокой твердости участков покрытия обеспечивает долговечность дробящих элементов. Повышение эффективности разрушения и измельчения зерна обеспечивается как за счет повышения износостойкости рабочих поверхностей дробящих элементов для переработки зерновых культур [1], так и оптимизацией геометрических параметров рельефа их поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдман, Я.С. Микроуглубления в поверхностном слое технических поверхностей и их исследование / Я.С. Фельдман. – Л. : ВИНТИ РАН, 1978. – 38 с.
2. Макаров, В.И. Расчетная зависимость интенсивности при эрозионном разрушении поверхностей трения. Теория и практика расчетов деталей машин на износ / В.И. Макаров. – М. : Наука, 1983. – С. 21–27.
3. Майер, Л. Статистическая механика : [пер. с англ.] / Л. Майер, М. Майер ; под ред. Д.Н. Зубарева. – М. : Мир, 1960. – 544 с.
4. Глебов, Л.А. Повышение эффективности измельчения компонентов комбикормов / Л.А. Глебов. – М. : ЦНИИТЭИ «Минзага СССР», 1984. – 44 с. – (Комбикормовая промышленность).

Поступила 8.07.2020

USE OF WORKING BODIES WITH DISCRETE COVERINGS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF GRAIN CRUSHING

A. DUDAN, V. LOPATA, V. KALINICHENKO, O. LOPATA, T. IVCHENKO, A. GRISHENKO

The article discusses the influence of the working surface of crushing elements with a coating of a discrete structure having a relief in the form of hemispheres located on a plane on the destruction and grinding of grain raw materials during its free impact. It is shown that the working surface of crushing elements coated with a discrete structure with a hemispherical relief, not yielding to a plane in a direct impact, can be much more effective in grinding grain raw materials if the angle of incidence of grain is increased. The theoretical justification and experimental results are given for grinding wheat grain by crushing elements with a working surface with discrete structure coatings.

Keywords: discrete structure coatings, grinding, grain, hardness, wear resistance, ricochet working surface, crushing elements.

УДК 621.793.7.001.5

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ВАКУУМНЫМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИМ АЗОТИРОВАНИЕМ
В ПЛАЗМЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА**

*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН (Полоцкий государственный университет),
канд. техн. наук А.В. РУТКОВСКИЙ*

*(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев),
канд. техн. наук, доц. М.С. АГЕЕВ (Херсонская государственная морская академия, Украина),
д-р техн. наук, проф. В.И. МИРНЕНКО (Национальный университет обороны Украины
им. Ивана Черняховского, Киев),*

*канд. техн. наук Т.В. СМИРНОВА (Центральноукраинский национальный технический
университет, Кропивницкий),*

канд. техн. наук, доц. О.В. РАДЬКО (Национальный авиационный университет, Киев)

В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния параметров процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда на микротвердость, глубину диффузионного насыщения, величину и распределение остаточных напряжений в упрочненных слоях стальных поверхностей. На основе использования методов экспертных оценок и результатов серии отсеивающих экспериментов определены критерии оптимизации (предел выносливости и коррозионная стойкость) и управляемые факторы для математического моделирования формирования упрочненных ионноазотированных поверхностных слоев. Получена математическая модель процесса формирования упрочненных поверхностей вакуумным термоциклическим азотированием в плазме пульсирующего тлеющего разряда по критериям предела выносливости и коррозионной стойкости. Анализ последних исследований и публикаций показал отсутствие рекомендаций по выбору оптимальных технологических параметров вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда, которые использовались бы для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают необходимость дальнейшего изучения технологии вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда и целесообразность ее оптимизации.

Ключевые слова: *вакуумное термоциклическое азотирование, математическая модель, технологический процесс, плазма, пульсирующий тлеющий разряд.*

Введение. На основе теории термоциклической усталости и явления аномального массопереноса при импульсном воздействии в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины разработана технология ускоренного азотирования в тлеющем разряде при циклическом изменении температуры за счет периодической подачи напряжения разряда [1–4]. Технология синтезирована на основе теории термоусталости, дискретно-импульсном вводе энергии в теплотехнологиях, эффекта аномального массопереноса при воздействии импульсных деформаций. Эффект аномального массопереноса обеспечивается термическими напряжениями, возникающими за счет циклических изменений температуры процесса. Теория термической усталости определяет условия получения величин термических напряжений, достаточных для ускорения диффузии азота в металл, но безопасных, чтобы не повредить изделие. Дискретно-импульсный ввод энергии ускорит нагрев в 2–5 раз, что позволяет увеличить термические напряжения и, соответственно, скорость диффузии азота [1–4]. Технология ускоренного азотирования в тлеющем разряде при циклическом изменении температуры за счет периодической подачи напряжения разряда основывается на эффективном решении комплекса взаимосвязанных научно-методологических проблем на границе термомеханики, металлофизики и теплофизики [1–4].

Вакуумное термоциклическое азотирование в плазме пульсирующего тлеющего разряда (ВТАППТР) следует рассматривать как альтернативу классической цементации с последующей закалкой. Следует подчеркнуть, что американский стандарт ASTM A 706 ограничивает и запрещает закалку с отпуском и финишной механической обработкой из-за технических сложностей и повышения стоимости. Новая технология не требует финишной механической обработки [1; 2; 4]. Главная особенность ВТАППТР – использование эффекта аномального массопереноса азота на поверхности обрабатываемой детали путем создания поля термических напряжений в поверхностном слое за счет циклического включения и исключения тлеющего разряда. Учитывая ускорение массопереноса при термоциклировании за счет возникновения термических напряжений, было принято решение разработать технологию химико-термической обработки (ХТО) на базе классической технологии ионного азотирования (ИА), которая во всем мире работает в изотермическом режиме. Технология ИА заключается в сокращении продолжительности ХТО, которая

относится к наиболее энергоемким в машиностроении. Предыдущие попытки создать технологию термоциклического ионного азотирования (ТЦИА) дали положительные результаты [1–4].

Технология ВТАППТР не использует печные устройства. Ионное азотирование по сравнению с печным имеет следующие преимущества: ускоряет диффузионные процессы в 1,1–2 раза; позволяет получать диффузный слой регулируемого состава и строения; характеризуется незначительными деформациями изделий и высоким качеством поверхности; дает возможность азотировать коррозионно-стойкие, жаропрочные и мартенситно-старяющие стали без дополнительной обработки; значительно сокращает время процесса за счет уменьшения времени нагрева и охлаждения; обладает большой экономичностью, повышает коэффициент использования электроэнергии, сокращает расход насыщающих газов; нетоксично и соответствует требованиям по защите окружающей среды [1–4].

В мировой практике для азотирования используют аммиак. Экологическое преимущество технологии ВТАППТР заключается в отказе от его применения. Обработка происходит тлеющим разрядом в смеси аргона с азотом. Этим также устраняется негативное влияние водорода на сердцевину детали – водородное охрупчивание и водородная коррозия. Замена классического газового азотирования в среде аммиака на технологию ВТАППТР в смеси азота и аргона обеспечивает сокращение продолжительности обработки в 10 раз [1–4]. В отличие от классических технологий ХТО технология ВТАППТР не создает сплошного нагрева детали, а обеспечивает нагрев только поверхностного слоя на глубину, необходимую для его упрочнения. Нагрев происходит за счет энергии тлеющего разряда, поэтому нет необходимости использовать печи [1–4].

Предложенная технология ВТАППТР, в отличие от классических технологий ХТО, позволяет снизить электрозатраты и уменьшить энергоемкость в 10 раз; сократить в 2–3 раза время обработки за счет отсутствия печных устройств и сквозного прогрева детали, пауз в электропитании в полцикле охлаждения детали, за счет циклического характера скоростного дискретного энерговода и ускорения диффузных процессов [1–4]. Таким образом, циклический характер нагрева изделия позволяет сократить в 2–5 раза необходимую мощность источников электрического питания и отнести технологию ВТАППТР к категории энергосберегающих. Кроме того, ВТАППТР повышает твердость поверхности на 20%, не меняет форму, размеры и шероховатость поверхности детали. Поэтому она используется без финишной заключительной механической обработки. Это значительно упрощает технологию производства при повышении долговечности и износостойкости детали в 4 раза, предела многоциклового усталости – на 25% [1–4].

Основная часть. *Оборудование для вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда.* Для исследования процесса ВТАППТР использовалась универсальная установка «ВИПа-1», разработанная в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины (рисунк 1) [1; 4].



Рисунок 1. – Установка для ВТАППТР

В установке используют абсолютно экологически чистый вакуумный процесс, потребление электроэнергии снижено в 4 и более раза, продолжительность процесса сокращена в 2 раза, отсутствуютковки деталей (особенно длинномерных) и хрупкость поверхностного слоя. Принцип работы вакуумного оборудования для проведения ВТАППТР основан на возможности ионизации газа, который подается в вакуумную камеру с последующим получением плазменно-химического соединения на поверхности детали. Таким образом, на поверхности детали получаются твердые растворы азота, при этом служебные свойства деталей (твердость, износостойкость и т.д.), а также их ресурс повышаются.

Характеристика процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Процесс ВТАППТР реализуется в две стадии: очистка поверхности перед азотированием и именно азотирование. Технологический процесс ВТАППТР сводится к следующим операциям [1–4]: 1) обезжиривания деталей; 2) установка деталей на устройстве, которое служит для местной защиты от азотирования (покрыть защитную поверхность металлическим и диэлектрической экраном). Зазор

между деталью и экраном допускается не более 0,3–0,5 мм; 3) установка в камеру печи деталей, термопары и устройства для контроля азотирования; 4) очистка поверхности детали катодным распылением в течение 15–40 минут под напряжением 800–1000 В при давлении около 133 Па. Катодное распыление обрабатываемой поверхности обеспечивает нагрев деталей до 300–400 °С. Выход на заданную температуру азотирования и выдержка для получения нужной толщины азотированного слоя обеспечиваются параметрами и режимом ВТАППТР, представленными в таблицах 1 и 2. Давление в период насыщения азотом поддерживается в интервале 400–650 Па, рабочее напряжение – 350–550 В; 5) охлаждение деталей в камере печи до 150–200 °С при давлении 13,0–65 Па продолжается 1,0–2,0 ч.

При экспериментальных исследованиях использовали образцы из стали 40Х13 размером 30х30 мм и толщиной 10 мм. Газовый режим азотирования (таблица 2) обеспечивает равномерное упрочнение поверхностей образцов (равномерную толщину диффузионного слоя).

Таблица 1. – Основные параметры процесса ВТАППТР деталей из различных сталей

Марка стали	Температура, °С,	Газовый режим	Выдержка, ч, для получения слоя толщиной, мм					Твердость на поверхности, HV
			0,15–0,2	0,2–0,25	0,25–0,3	0,3–0,35	0,35–0,4	
40Х	520	1,2	4–5	7–9	9–12	12–15	15–18	500–550
40ХФА	520	1	4–5	6–8	9–12	15–18	–	–
	520	2	4–5	6–8	8–10	12–15	15–18	510–560
18ХГТ	530	1,2	4–5	6–8	9–12	15–18	–	620–680
	550	1,2	3–4	4–5	6–8	9–12	15–18	530–600
30Х3МФ	530	1	4–5	6–8	9–12	15–18	–	700–760
	530	2	4–5	5–7	6–8	9–12	15–18	–
38Х2МЮА	550	1,2	4–5	5–7	7–9	9–12	15–18	900–950

Таблица 2. – Газовый режим процесса ВТАППТР деталей из различных сталей

№ эксперимента	Время диффузионного насыщения, мин	Давление реакционного газа, Па	Состав реакционного газа	Температура газа, К	Эксплуатационная температура, К	Микротвердость поверхностного слоя, МПа	Толщина диффузионного слоя, мкм
1	180	125	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Аг	773	788	3700	288
2	150	200	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	725,5	10062	125
3	210	75	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Аг	673	850,5	9955	286
4	150	175	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Аг	873	819,2	8175	215
5	210	50	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Аг	773	694,3	10590	142
6	180	100	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Аг	673	881,8	8270	253
7	240	225	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	773	756,8	8985	208
8	90	250	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Аг	673	709,9	9100	267
9	180	125	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	834,9	8945	181
10	150	50	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Аг	773	772,4	10235	179
11	210	175	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	673	897,3	8144	312
12	150	100	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	803,6	8335	228
13	210	225	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Аг	673	678,6	10835	267
14	180	150	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	773	866	8841	215
15	240	25	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	873	741	9150	191
16	90	150	90% N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	673	780	8659	212

Технологические параметры формирования упрочненных слоев: температура термоциклирования – 550 ± 30 °С, давление – 25–150 Па, время обработки – 10,00 ч, соотношение реакционных газов – 80% Ar + 20% N₂.

С помощью предлагаемой технологии возможна обработка различных деталей. Например, коленчатые валы, гильзы двигателей внутреннего сгорания, шестерни различных модулей, шнеки экструдеров, валы, штампы, пресс-формы, длинномерные детали с отверстиями и др. Ионное азотирование используют для обработки чугунов и различных сталей и сплавов: конструкционных и инструментальных, мартенситостареющих, коррозионностойких, хромистых и хромоникелевых сталей ферритного и аустенитного класса и т.п. Перспективна новая технология для упрочнения алюминия, титана, тугоплавких металлов – ниобия, молибдена.

Анализ последних исследований и публикаций [1–4] показывает отсутствие обобщающих выводов и рекомендаций по выбору оптимальных параметров ВТАППТР, которые использовались для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают актуальность оптимизации технологии ВТАППТР и необходимость дальнейшего ее изучения.

Построение математической модели процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Разработка технологического процесса (ТП) связана с решением задач по оптимизации. Это объясняется тем, что значительное количество технологических параметров в сочетании с широкой номенклатурой материалов, из которых формируют упрочненный поверхностный слой (УПС), дают технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принятых решений будет зависеть от наличия необходимых критериев оценки работоспособности конструктивного материала из УПС в заданных условиях эксплуатации.

В теории планирования эксперимента к критериям оптимизации предъявляются требования, выполнение которых необходимо для успешного решения задачи [5–7]: 1) иметь физический смысл и характеризовать исследуемый процесс; 2) быть воспроизводимыми, т.е. при повторении опытов в номинально одинаковых условиях полученные значения должны совпадать с точностью до ошибки эксперимента; 3) каждому значению независимых переменных должно соответствовать одно значение отклика; 4) иметь измеряемые значения при любой комбинации выбранных уровней факторов; 5) иметь значение и задаваться одним числом, а также допускать смену при любой возможной комбинации выбранных уровней варьирования.

С помощью использования ТП ВТАППТР, который влияет на качество поверхностного слоя, можно управлять значениями параметров конструктивной прочности материалов. Понятие конструктивной прочности включает ряд параметров или показателей, характеризующих не только прочность конструктивных элементов, но и их долговечность (ресурс), несущую способность, а главное надежность. К показателям конструкционной прочности элементов можно отнести прочность при различных видах нагрузки (растяжение, изгиб, контактные нагрузки и др.), при линейном, двух- и трехосных напряженном состоянии с разным характером приложения нагрузки (импульсным, длительным, стационарным или переменным), в т.ч. программным, при низких и высоких температурах, в условиях воздействия окружающей среды [7–10].

Оценивая условия работы наиболее нагруженных конструктивных элементов, установлено одновременное воздействие динамических нагрузок, повышенных температур и коррозионной среды.

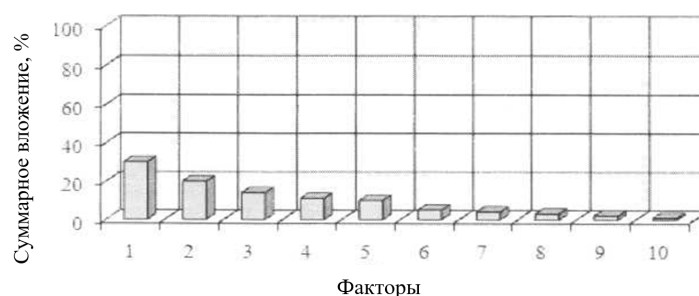
Среди динамических нагрузок особый интерес представляют циклические нагрузки. При систематическом повторении погрузки и разгрузки происходит накопление дефектов структуры материала, что приводит к возникновению микроскопических трещин, сочетание которых вызывает разрушение от усталости. Установить максимальную циклическую нагрузку, при которой материал не разрушается, можно с помощью термомеханических высокочастотных испытаний на усталость, т.е. определить значения предела выносливости укрепленного конструктивного материала. Коррозионное повреждение существенно снижает механические свойства конструкционного материала. Таким образом, в качестве критериев оптимизации технологического процесса ВТАППТР выбраны предел выносливости и коррозионная стойкость, характеризующаяся удельным увеличением массы (таблица 3).

Таблица 3. – Критерии оптимизации

Название критерия оптимизации	Цель	Обозначения	Ограничения
Граница выносливости	максимум	Y_1	–
Удельное увеличение массы	минимум	Y_2	–

При определении управляемых факторов были рассмотрены все существующие группы факторов, которые могут оказывать влияние на ТП. При выборе факторов учитывалась область, ограничивающая их возможное варьирование, а также размерность. Для каждого i -го фактора устанавливались следующие значения: x_{i0} – основной уровень фактора; $X_{i\max}$, $X_{i\min}$ – верхний и нижний уровни i -го фактора, применяемые при исследовании; A_x – интервал варьирования. Факторы должны отвечать следующим требованиям: быть управляемыми; не зависеть от других переменных; соответствовать требованиям совместимости; интервал изменения каждого фактора не должен быть достаточно малым и широким; быть однозначны (одному значению независимой переменной соответствует одно значение отклика); выбор факторов должен быть полным; точность фиксации факторов должна быть высокой.

При выборе управляемых факторов для изучения процесса ВТАПШТР были рассмотрены все существующие группы факторов, которые могут оказывать влияние на ТП. После экспертной оценки [11; 12] и серии отсеивающих экспериментов был получен средний априорный ранжированный ряд факторов, влияющих на ТП ВТАПШТР (рисунок 2).



1 – температура насыщения; 2 – давление реакционного газа; 3 – состав реакционного газа; 4 – время ионной обработки; 5 – эксплуатационная температура; 6 – толщина УПС; 7 – материал детали; 8 – частота колебания; 9 – рабочий ток процесса насыщения; 10 – рабочее напряжение процесса насыщения

Рисунок 2. – Ранжированный ряд конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов

Для моделирования процесса ВТАПШТР на основе анализа проведенного ранжирования была определена группа факторов, влияющая на величину критериев оптимизации. В матрицу планирования были выбраны управляемые факторы: время диффузионного насыщения, давление и состав реакционного газа, температура диффузионного насыщения и эксплуатационная температура (таблица 4).

Таблица 4. – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозначения	Уровни варьирования
Время диффузионного насыщения, мин	X_1	90–240 (шаг 30)
Давление реакционного газа, Па	X_2	25–250 (шаг 25)
Состав реакционного газа	X_3	1) 90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Ar; 2) 95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ ; 3) 80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Ar
Температура газа, К	X_4	673–873 (шаг 100)
Эксплуатационная температура, К	X_5	663–913

Значения факторов X_2 и X_4 , приведенные в таблице, в течение процесса ВТАПШТР непостоянны: давление реакционного газа периодически (с периодом 15–30 мин) снижается до нуля, а температура процесса колеблется в пределах 25–35 °С.

Исследование свойств ионноазотированных слоев. При исследовании микротвердости поверхностных слоев после ВТАПШТР обнаружен рост ее значений до 10 835 МПа (таблица 5) и уменьшение до 3700 МПа. Согласно таблице 5 проведение азотирования в пульсирующем тлеющем разряде способствует увеличению микротвердости и глубины упрочнения обработанных поверхностных слоев. В любом случае такие значения микротвердости образцов в 2,5–3,0 раза больше, чем без влияния пульсирующего тлеющего разряда, и в 1,5 раза больше, чем у образцов после газового азотирования (90% N₂ + 10% Ar; $T = 600$ °С, время азотирования $\tau = 4,0$ ч). Анализ данных позволяет сделать вывод о существовании некоторых диапазонов температуры азотирования T (°С) и давления реакционного газа P (Па), при которых микротвердость поверхностных слоев достигает своих максимальных значений: для температуры азотирования T °С этот диапазон находится в пределах 550–600°С, для давления газа P (Па) –

в пределах 200–230 Па. С увеличением времени диффузионного насыщения микротвердость поверхностного слоя уменьшается, более интенсивно – после 2 ч обработки. Что касается влияния на микротвердость состава реакционного газа, то установлено, что максимальные значения она приобретает при использовании смеси 90% N₂ + 5% C₃H₈ + 5% Ar, минимальные – при смеси 80% N₂ + 5% C₃H₈ + 15% Ar.

Качество поверхностного слоя определяется шероховатостью поверхности (таблица 6). При исследовании качества поверхности упрочненных образцов обнаружено незначительное ее ухудшение с Ra = 0,25 мкм в неазотированных образцах до Ra = 0,29–0,39 мкм в азотированных. Режимы обработки ВТАППТР для данных таблицы 5 и 6 представлены в таблице 2.

Таблица 5. – Микротвердость упрочненных поверхностных слоев образцов после ВТАППТР

№ режима обработки	Микротвердость поверхностного слоя, МПа	
	без пульсирующего тлеющего разряда	с пульсирующим тлеющим разрядом
0	3100	3700
1	9032	10062
2	8164	9955
3	7414	8175
4	8614	10590
5	8047	8270
6	8089	8985
7	8154	9100
8	7534	8945
9	9111	10235
10	9904	8144
11	7040	8335
12	9898	10835
13	7950	8841
14	8061	9150
15	7769	8659
16	7179	8663

Таблица 6. – Шероховатость поверхности ЗПШ образцов после ВТАППТР

№ режима обработки	Ra, мкм, образцов после вакуумного азотирования	Образцы после термоциклического азотирования Ra, мкм, ВТАППТР
0	0,248	0,218
1	0,324	0,291
2	0,385	0,364
3	0,335	0,353
4	0,310	0,312
5	0,284	0,347
6	0,330	0,326
7	0,275	0,242
8	0,294	0,385
9	0,286	0,381
10	0,315	0,294
11	0,304	0,236
12	0,294	0,308
13	0,328	0,315
14	0,302	0,319
15	0,299	0,290
16	0,330	0,361

Путем технологии ВТАППТР можно получить антикоррозионную способность, такую как и при использовании гальванических покрытий. В результате проведения исследований антикоррозионной способности ионноазотированных стальных образцов выявлено повышение коррозионной стойкости в 1,7–3,1 раза (таблица 7).

Таблица 7. – Результаты исследования коррозионной стойкости азотированных образцов

№ режима обработки	Удельное увеличение массы образца $\Delta m/m$ после 10 ч испытаний	
	без пульсирующего тлеющего разряда	с пульсирующим тлеющим разрядом
0	0,58	0,40
1	0,17	0,12
2	0,22	0,18
3	0,19	0,17
4	0,17	0,15
5	0,20	0,18
6	0,20	0,19
7	0,21	0,18
8	0,19	0,16
9	0,16	0,14
10	0,18	0,18
11	0,21	0,20
12	0,16	0,14
13	0,19	0,16
14	0,18	0,15
15	0,20	0,20
16	0,21	0,18

Для определения сопротивления усталости при упрочнении ВТАППТР исследовали не менее 10–15 образцов. Каждый образец доводили до разрушения, при этом амплитуду колебания образца и частоту нагрузки в течение всего времени исследования почти до его разрушения поддерживали постоянной. База испытаний на усталость $N = 10^7$ циклов нагрузки. При исследовании на усталость в условиях повышенных температур образец перед нагрузкой (т.е. до начала испытаний) нагревали до заданной температуры и выдерживали в камере нагрева дополнительно в течение 30 мин. Момент начала разрушения образца устанавливали с падением резонансной частоты его колебаний на 10–15 Гц.

На количественные характеристики усталости оказывает влияние температура окружающей среды. С повышением температуры испытания с 500 °С предел выносливости уменьшается. Активизируются диффузные процессы на поверхности образца под неаддитивным воздействием температуры и внешней среды, что приводит к появлению микроскопических поверхностных трещин, которые являются началом разрушения от усталости. На сопротивление усталости оказывают влияние число циклов нагружения и время нахождения образца при высоких температурах в условиях циклического нагружения. ВТАППТР ограничивает скорость прохождения диффузных процессов, что значительно влияет на повышение предела выносливости. Благодаря ТП ВТАППТР удалось повысить предел выносливости образцов на 15–20% с увеличением количества циклов до разрушения при одновременном действии циклических нагрузок и температуры.

Построение математических моделей ВТАППТР по результатам эксперимента. По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построены регрессионные модели зависимости критерия оптимизации, характеризующие предел выносливости упрочненных образцов от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Расчет модели осуществляется с помощью ППП ПРИАМ [11; 12]. Исходные данные представлены в таблицах 1, 2, результаты экспериментальных исследований – в таблицах 5–8. После обработки результатов эксперимента получена математическая модель, описывающая зависимость предела выносливости Y_1 и удельное увеличение массы Y_2 от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов:

$$Y_1 = 675,186 - 109,067x_5 + 30,5017x_2^2x_5 - 18,519x_2 + 33,5729x_1x_4^2 - 21,2256x_4^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,506646 - 0,236804x_4x_5^2 - 0,171444x_2x_5 - 0,166716x_1x_2^2 - 0,0272092x_1^2 - 0,195253x_2^2x_5^2, \quad (2)$$

где $Y_1 Y_2$ – математические модели пределы выносливости Y_1 и удельного увеличения массы Y_2 в кодированных значениях для σ_{-1} и $\Delta m/m$.

Формулы перехода от кодированных значений к натуральным:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1(X_1 - 1); & x_1^2 &= 1,6(X_1^2 - 0,625); \\ x_2 &= 0,249805(X_2 - 5,99688); & x_2^2 &= 1,60639(X_2^2 - 0,000330781X_2 - 0,377154); \\ x_4 &= 8,97817(X_4 - 0,368619); & x_4^2 &= 1,83884(X_4^2 - 0,0877399X_4 - 0,368613); \\ x_5 &= 0,0079028(X_5 - 786,463); & x_5^2 &= 1,61702(X_5^2 - 0,0366532X_5 - 0,36933), \end{aligned}$$

где X_1, X_2, X_4, X_5 – конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы (см. таблицу 4).

Таблица 8. – Результаты экспериментальных исследований

	Граница выносливости, σ_{-1} , МПа		Удельное увеличение массы образца, $\Delta m/m$	
	$Y_{1.1}$	$Y_{1.2}$	$Y_{2.1}$	$Y_{2.2}$
1	720	781	0,12	0,19
2	770	698	0,18	0,23
3	620	685	0,17	0,24
4	630	672	0,15	0,13
5	830	787	0,18	0,15
6	500	591	0,19	0,21
7	680	603	0,18	0,18
8	740	718	0,16	0,21
9	570	645	0,14	0,19
10	720	639	0,18	0,16
11	500	583	0,20	0,21
12	650	702	0,14	0,16
13	810	749	0,16	0,14
14	560	638	0,15	0,17
15	745	695	0,20	0,16
16	630	706	0,18	0,21

Полученные зависимости (1) и (2) проверены на адекватность, воспроизводимость и информативность результатов по критериям математической статистики. Результаты статистического анализа представлены в таблице 9. Результаты повторных исследований, проведенных в одинаковых условиях, проверялись на статистическую воспроизводимость по G – критерию Кохрена. Для всех регрессионных зависимостей $G_{расч} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Поэтому степень рассеивания результатов по строкам матрицы планирования одинакова, а результаты воспроизведены.

Проверка гипотезы на адекватность полученных моделей результатов эксперимента проводилась с использованием F – критерия Фишера. Для получения моделей при принятом уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{расч} < F_{табл}$, поэтому модель адекватно отражает результат эксперимента.

Оценка качества полученных математических моделей проводилась путем определения коэффициента множественной корреляции. Коэффициент множественной корреляции K показывает величину статистической связи по уравнению множественной регрессии V_i и начальным экспериментальным результатам. В полученных математических моделях коэффициенты множественной корреляции статистически значимы, т.е. $F_{расч} > F_{табл}$ при принятом уровне значимости. Итак, модели информативны и несут полезную информацию о процессе моделируемой системы.

Результаты статистического анализа (таблица 9) позволяют сделать вывод, что регрессионные зависимости адекватны и информативны, результаты воспроизведены, коэффициенты статистически значимы. Все это говорит о том, что регрессионные зависимости адекватно описывают процесс и их можно использовать для анализа и оптимизации ТП ВТАПШТР [11; 12].

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что основным механизмом повышения предела выносливости материалов вследствие диффузионного насыщения поверхности азотом в пульсирующем тлеющем разряде в термоциклическом режиме является упрочнение поверхностных слоев.

Таблица 9. – Результаты статистического анализа

Параметры статистического анализа	Значения параметров для моделей	
	σ_1	Δ/m
Остаточная дисперсия	879,001	0,00309292
Дисперсия воспроизводимости	2228,03	0,00155937
Расчетное значение F -критерия	2,53473	1,98344
Уровень значимости F -критерии: для адекватности для степеней свободы	0,05 $V_1 = 5$ $V_2 = 10$	0,05 $V_1 = 10$ $V_2 = 16$
Табличное значение F -критерия для адекватности	2,82757	2,49351
Стандартная ошибка оценки	29,6879	0,0592546
Стандартная ошибка оценки, скорректированная с учетом степеней свободы	34,668	0,0691945
Судьба рассеяния, которая объясняет модель	0,902121	0,859807
Введено регрессоров	6	6
Коэффициент множественной корреляции	0,949801	0,927258
Коэффициент множественной корреляции, скорректированный с учетом степеней свободы	0,930875	0,899348
F отношение для R	18,4334	12,266
Уровень значимости критериев: для информативности для степеней свободы	0,05 $V_1 = 50$ $V_2 = 26$	0,05 $V_1 = 50$ $V_2 = 26$
Табличное значение F -критерии для информативности	2,58679	2,58679
Критерии Бокса и Веца для информативности	1	1

Упрочнение поверхностных слоев происходит по следующим механизмам: образование структур с упрочняющими фазами (нитридов, карбонитридов и т.д.); упрочнение за счет образования твердых растворов, которые создают энергетический барьер и затрудняют перемещение дислокаций; уменьшение размеров зерен, что приводит к увеличению площади межзеренных границ и препятствует движению дислокаций. При диффузии азота в поверхностные слои большое значение приобретают остаточные напряжения сжатия, возникающие в случае диффузионного насыщения поверхности азотом. Внедренный в матрицу атом азота раздвигает соседние атомы, создавая остаточные напряжения сжатия. Эти напряжения эффективно сохраняют поверхность от разрушения.

Ионноазотирующая обработка значительно влияет на химические и адгезионные свойства поверхности упрочненных материалов. Образование химических соединений в сталях и сплавах за счет внедрения азота или повышения пределов его концентрации меняет скорость химических реакций и кинетику роста оксидных пленок, повышает их сцепление с основанием. Это приводит к уменьшению интенсивности образования адгезионных узлов схватывания и способствует улучшению механических свойств.

Заключение. Анализ проведенных исследований показывает отсутствие обобщающих выводов и рекомендаций по выбору оптимальных технологических параметров ВТАППТР, которые использовались бы для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают актуальность оптимизации технологии ВТАППТР и необходимость дальнейшего изучения. Математические модели процесса ВТАППТР построены методом случайного поиска на основе равномерно распределенных случайных точек, пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей», теории планирования эксперимента и математической статистики.

После экспертной оценки и серии отсеивающих экспериментов определены критерии оптимизации (предел выносливости и коррозионная стойкость) и управляемые факторы для математического моделирования формирования упрочненных ионноазотированных поверхностных слоев. Полученные математические модели описывают зависимости предела выносливости и коррозионной стойкости от параметров процесса ВТАППТР. Их можно использовать для оптимизации ТП ВТАППТР.

В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния параметров ТП ВТАППТР на микротвердость, глубину диффузионного насыщения, величину и распределение остаточных напряжений в упрочненных слоях стальных поверхностей. Показано, что:

– для получения максимальной микротвердости поверхностного слоя достигает 7600 МПа, давление реакционного газа должен находиться в пределах 200–250 Па, время диффузионного насыщения – 90–150 мин; температура процесса – 500–600 °С;

– для получения максимальной толщины диффузионного слоя 150–305 мкм давление реакционного газа должен находиться в пределах 200–250 Па, время диффузионного насыщения – 180–240 мин; температура процесса – 550–600 °С;

– в ионноазотированных слоях возникают остаточные напряжения сжатия порядка 445–950 МПа, уровень и распределение которых зависят от технологических параметров процесса ВТАПТТР и от предварительной термообработки.

Согласно исследованиям свойств поверхностных слоев образцов, упрочненных азотированием, установлено, что благодаря использованию ВТАПТТР коррозионная стойкость повышается в 3,1 раза, предел выносливости стальных конструкций при температурах до 640 °С – на 15–20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Термоциклическое азотирование как синтез разработок НАН Украины / В.В. Харченко [и др.] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : материалы 12-го Междунар. науч.-техн. семинара, Свалява, 20–24 февр. 2012 г. / Ассоц. технологгов-машинистроителей Украины [и др.]. – Киев : АТМ Украины, 2012. – С. 287–290.
2. Ляшенко, Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 20–21.
3. Ляшенко, Б.А. Повышение прочности и износостойкости металлических изделий с помощью импульсной методики нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий / Б.А. Ляшенко, А.О. Хоцяновский, А.Ю. Кумуржи // Проблемы прочности. – 2014. – № 3. – С. 155–163.
4. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді : пат. України 19782 : МПК С23С 8/06 / А.В. Рутковский, Б.А. Ляшенко ; дата публ.: 15.12.2006.
5. Дубровська, Г.М. Системи сучасних технологій / Г.М. Дубровська, А.П. Ткаченко ; за ред. А.П. Ткаченка. – Черкаси : ЧДТУ, 2001. – 195 с.
6. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. – М. : Наука, 1971. – 283 с.
7. Скляр, Н.М. Конструктивная прочность металлов / Н.М. Скляр // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1981. – № 6. – С. 8–12.
8. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / Г.С. Писаренко. – Киев : Наукова думка, 1994. – Ч. 1. – 286 с.
9. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко. – Киев : Вища школа, 1986. – 775 с.
10. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
11. Радченко, С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.Г. Радченко. – Київ : Політехніка, 2001. – 88 с.
12. Лапач, С.Н. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич // Программные продукты Украины : каталог. – Киев : Текпор, 1993. – С. 24–27.

Поступила 08.07.2020

INCREASING THE STRENGTH PROPERTIES OF SURFACES OF STEEL PARTS VACUUM THERMOCYCLIC NITROGENIZATION IN PLASMA OF PULSATING GREAT DISCHARGE

A. DUDAN, A. RUTKOVSKY, M. AHIEIEV, V. MIRNENKO, T. SMYRNOVA, O. RADKO

As a result of the studies, the regularities of the influence of the VTAPIITR TP parameters on the microhardness, the diffusion saturation depth, the magnitude and distribution of residual stresses in the hardened layers of steel surfaces are established. Based on the use of expert assessment methods and the results of a series of screening experiments, optimization criteria (endurance limit and corrosion resistance) and controlled factors for mathematical modeling of the formation of reinforced ion-nitrated surface layers are determined. A mathematical model of the TP of the formation of reinforced surfaces of the VTAPPTR TP according to the criteria of endurance and corrosion resistance is obtained. An analysis of the studies showed that there are no general conclusions and recommendations on the selection of the optimal technological parameters of the VTAPTR that would be used for the practical application of this technology. These circumstances confirm the need for further study of the VTAPTR technology and the expediency of its optimization.

Keywords: vacuum thermocyclic nitriding, mathematical model, technological process, plasma, pulsating glow discharge.

УДК 621.91.01

ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

Приведены результаты экспериментальных исследований изнашивания и стойкости режущего лезвия круглого эксцентрично установленного резца из быстрорежущей стали при точении синусоидальных профильных поверхностей. Установлены характер износа передней и задней поверхностей режущего лезвия и влияние параметров схемы обработки и элементов режима резания на стойкость резца, обоснован критерий его затупления, выявлены факторы высокой стойкости резца.

Ключевые слова: синусоидальная цилиндрическая поверхность, ротационное точение, ротационный резец, износ, критерии износа, стойкость.

Введение. Влияние режимов резания на изнашивание и стойкость ротационного инструмента при точении круглых цилиндрических поверхностей широко отражено в литературных источниках [1–6; и др.]. В [1] отмечено, что вследствие низкой температуры режущего лезвия лункообразный износ отсутствует, изнашивание твердосплавного резца происходит по задней поверхности с образованием кольцевой фаски, режущая кромка округляется, передняя поверхность практически не изнашивается. В [2] установлено, что изнашивание инструмента происходит по обеим поверхностям равномерно по длине режущего лезвия, однако более подвержена изнашиванию задняя поверхность по причине ее высокой скорости трения по поверхности резания. Износ быстрорежущего инструмента имеет механический, а на заключительной стадии – адгезионный вид. Изнашивание твердосплавного инструмента преимущественно термоусталостное. Известно [3], что независимо от обрабатываемого и инструментального материала схемы резания зависимости изнашивания инструмента от времени его работы идентичны, период стойкости быстрорежущего инструмента примерно одинаков для различных видов ротационного резания. Изнашивание инструмента сопровождается образованием фаски на задней и лунки на передней поверхностях, имеет абразивный и термоусталостный вид. Согласно исследованию [4], изнашивание ротационных резцов происходит одновременно по задней и передней поверхностям равномерно по всей длине режущей кромки. Передняя поверхность изнашивается в виде кольцевой лунки или кольцевой конической фаски, задняя – кольцевой конической фаски. Характер изнашивания быстрорежущих и твердосплавных ротационных резцов идентичен и имеет адгезионный и абразивный вид.

Параметры схемы обработки синусоидальных профильных поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом [5] существенно отличаются от традиционного ротационного точения круглых поверхностей. В частности, кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки в зоне резания, может принимать значения больше 6, а глубина резания периодически изменяется при обработке профильных валов из круглых заготовок. Указанные особенности кинематики процесса резания приводят к тому, что резец работает в условиях, отличных от ротационного точения цилиндрических поверхностей, что обуславливает иной характер его изнашивания при точении синусоидальных поверхностей.

Методика исследования. Экспериментальные исследования изнашивания ротационных резцов выполнялись на шлипфрезерном станке модели HECKERT GFLV-250. Обрабатывались круглые заготовки из стали 40X диаметром 25–45 мм круглыми резцами из быстрорежущей стали P6M5 диаметром 55–60 мм, значения статических углов которых: передний угол 10° , задний – 20° ; биение режущего лезвия после заточки 0,01–0,02 мм. Параметры схемы обработки: количество выступов профиля $m = 3$; кинематический коэффициент $k = 2–9$; эксцентриситет установки резца относительно оси его вращения $e = 1,5$ мм; частота вращения резца $n_r = 56; 71; 90$ мин⁻¹; глубина резания $t = 0,5–3$ мм; подача $s_o = 0,134–0,8$ мм/об. Резание производилось с применением СОЖ (масло И-20), подаваемой системой охлаждения станка.

Величина износа рабочих поверхностей инструмента измерялась на микроскопе Nikon Epihot 200 с точностью до 0,005 мм при увеличении в 50 раз.

На видеоизмерительном микроскопе Norgau NVM-4030D измерялся радиус резца с точностью 0,001 мм до и после обработки. В качестве измерительной базы принималось посадочное отверстие

и шпоночный паз резца для фиксации угловых координат точек режущей кромки, соответствующих максимальной и минимальной глубине резания.

Исследование процесса изнашивания резца производилось при $k = 3,6$; $n_t = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3 \text{ мм}$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$.

Основные результаты. В первые 20 минут работы резца наблюдается образование микросколов режущей кромки, о чем свидетельствует ухудшение шероховатости, образование на обрабатываемой поверхности выступов (рисунок 1). В дальнейшем происходит округление режущей кромки, сглаживание микросколов, процесс резания стабилизируется, риски на обрабатываемой поверхности не образуются. Шероховатость поверхности в течение 300 мин остается практически постоянной, на задней поверхности образуется фаска шириной до 0,2 мм. При дальнейшей обработке радиус округления режущей кромки достигает 0,25 мм, появляются сколы, что сопровождается ухудшением качества обрабатываемой поверхности.

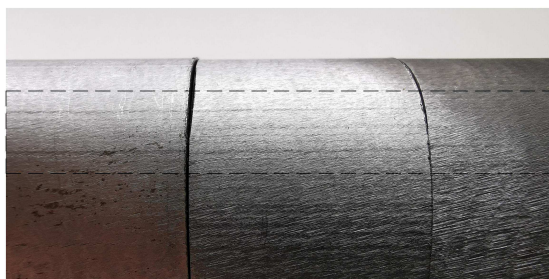


Рисунок 1. – Развитие продольных рисок на обработанной поверхности

Таким образом, изнашивание резца можно разделить на следующие этапы: образование микроскалываний на режущей кромке, ее приработка, образование фаски износа по задней поверхности, округление режущей кромки, образование на ней выкрашиваний.

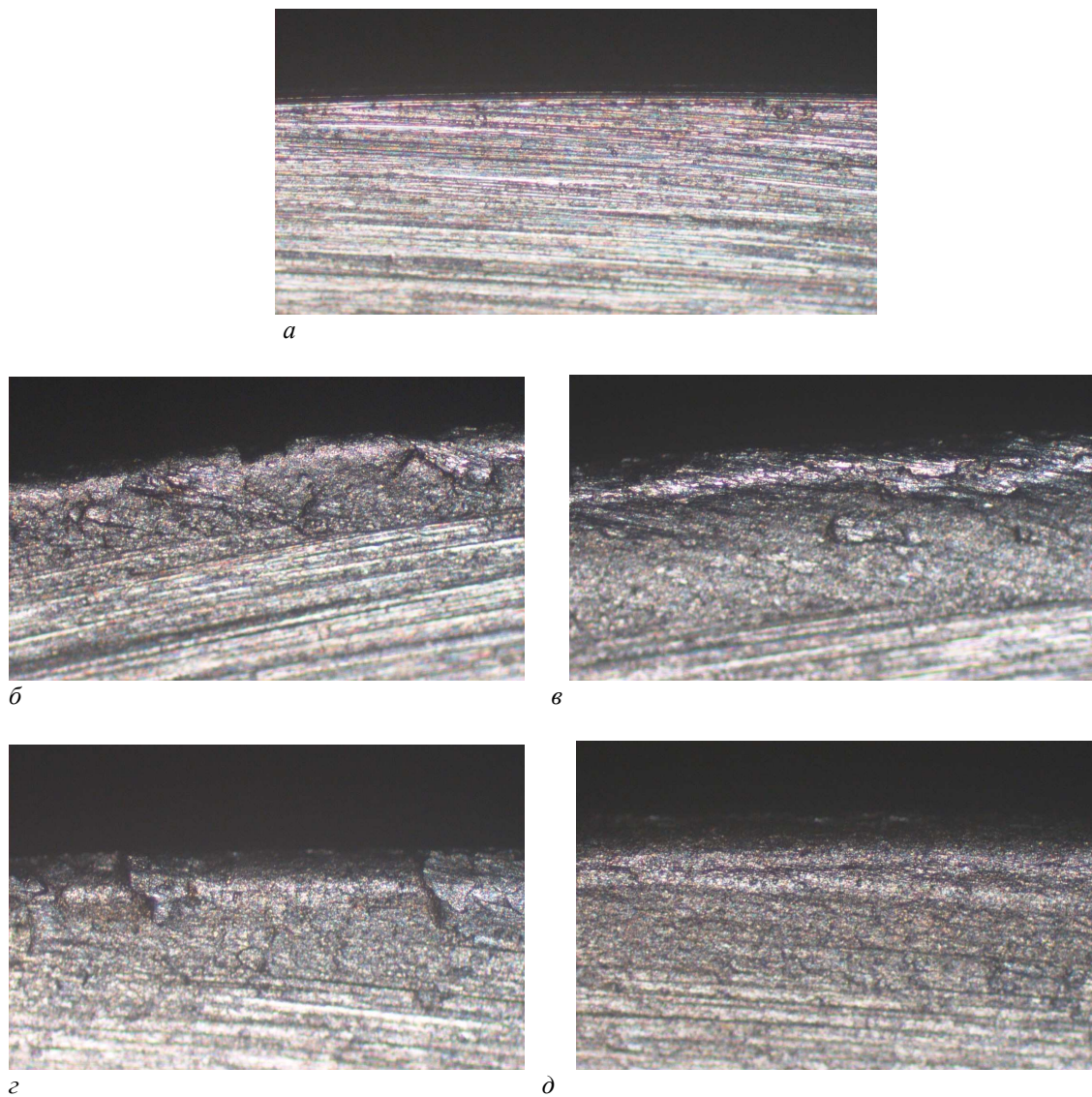
При исследовании изнашивания инструмента установлено, что передняя поверхность ротационного резца подвергается адгезионному изнашиванию, о чем свидетельствуют прилипшие частицы стружки (рисунок 2, б, з), которые образуются преимущественно на участке режущей кромки, соответствующей минимальной глубине резания, а также абразивному изнашиванию, проявлением которого являются царапины на передней поверхности резца (рисунок 2, в, д). Анализ фотографий передней поверхности позволяет сделать вывод, что с увеличением кинематического коэффициента происходит ее «затираение», что способствует снижению интенсивности адгезионного изнашивания, больше всего на участке режущей кромки, соответствующей максимальной глубине резания. Низкая температура резца [6] исключает лункообразное изнашивание передней поверхности.

Более подвержена износу задняя поверхность резца – с образованием фаски, выкрашиванием режущей кромки (рисунок 3), что обусловлено высокой скоростью трения задней поверхности по поверхности резания, особенно с увеличением кинематического коэффициента.

На режущем лезвии образуется оксидная пленка светло-желтого цвета (при минимальной глубине резания) (рисунок 3, б) и фиолетового (при максимальных значениях глубины резания и кинематического коэффициента) (рисунок 3, д), что свидетельствует о перепадах температур менее 80 °С. В связи с этим режущее лезвие не подвергается тепловым ударам, что исключает термоусталостное изнашивание лезвия и повышает стойкость резца.

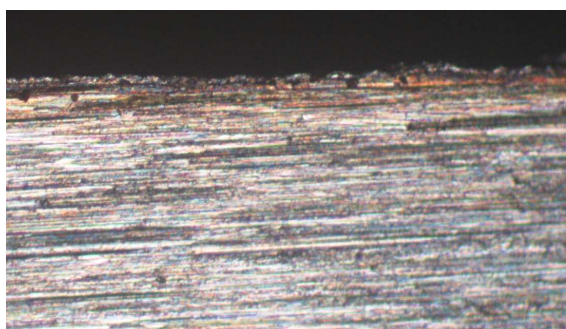
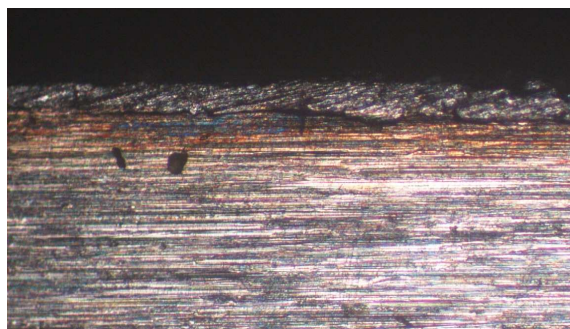
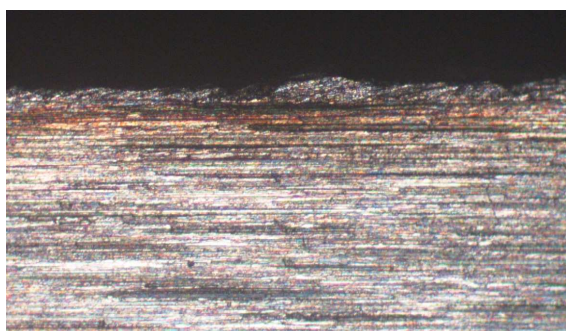
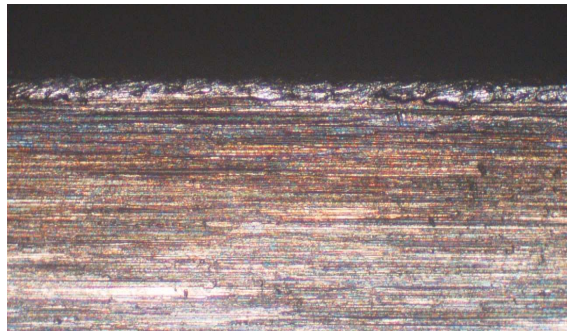
Вследствие периодически изменяющейся глубины резания округление режущей кромки также происходит неравномерно, например, от 0,05 мм при малых глубинах и $k = 3,6$ (рисунок 4, б) до 0,2 мм при глубине 3 мм и $k = 6,6$ (рисунок 4, д). Эта же причина приводит к неравномерности износа по длине режущей кромки: после обработки в течение 110 мин установлено, что неравномерность износа составила 0,01–0,015 мм при диаметре резца 55 мм.

Для оценки стойкости ротационного резца необходимо установить критерии его затупления, при которых процесс резания затрудняется или становится невозможным. В исследованиях [2] рекомендовано принять критерием затупления для быстрорежущего инструмента фаску износа по задней поверхности, равную 0,4–0,6 мм, в [4] – 0,6 мм, а для твердосплавного инструмента – 0,4 мм. При исследовании резания круглыми резцами из твердого сплава [1] отмечено, что изнашивание проявляется в виде выкрашивания и скалывания режущей кромки и сопровождается резким ухудшением качества поверхности, а при резании труднообрабатываемых материалов с достижением радиуса округления кромки 0,8 мм существенно затрудняет процесс резания.



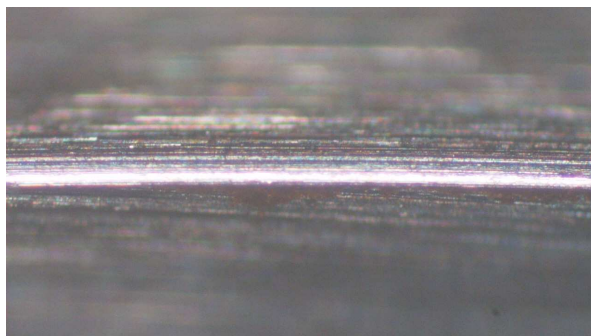
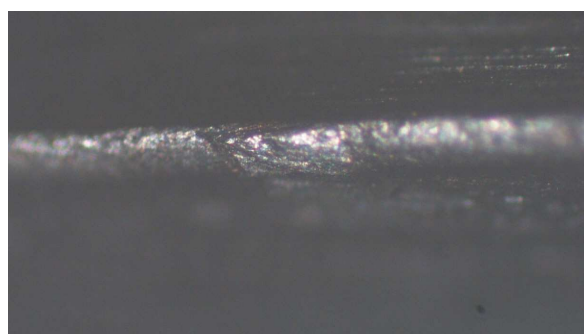
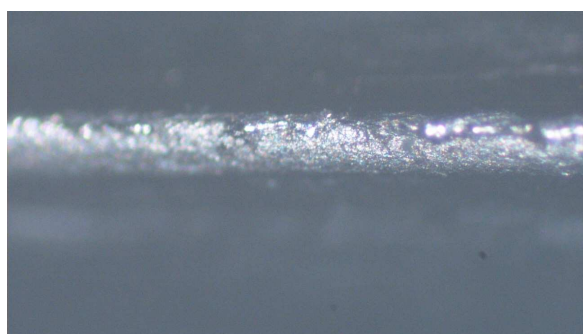
a – передняя поверхность после заточки;
б, в – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 3,6$ соответственно;
з, д – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 6,6$ соответственно

Рисунок 2. – Фотографии изношенных участков передней поверхности резца
($n_{\tau} = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3 \text{ мм}$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$; $\tau = 335 \text{ мин}$)

*a**б**в**г**д*

a – задняя поверхность после заточки;
б, в – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 3,6$ соответственно;
г, д – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 6,6$ соответственно

Рисунок 3. – Фотографии изношенных участков задней поверхности
($n_{\tau} = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3 \text{ мм}$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$; $\tau = 335 \text{ мин}$)

*a**б**в**г**д*

a – режущая кромка после заточки;
б, в – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 3,6$ соответственно;
г, д – участок, соответствующий минимальной и максимальной глубине резания при $k = 6,6$ соответственно

Рисунок 4. – Округление режущей кромки
($n_{\tau} = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3 \text{ мм}$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$; $\tau = 335 \text{ мин}$)

Исследование развития изнашивания резца показали, что сколы и зазубрины режущей кромки возникают раньше образования критической фаски износа или округления режущей кромки, поэтому последние не могут быть выбраны в качестве критериев затупления резца. В связи с этим при исследовании стойкости ротационного инструмента целесообразно принять технологический критерий затупления, выражающийся в ухудшении шероховатости обработанной поверхности, образовании на ней выступов из-за сколов и зазубрин режущей кромки.

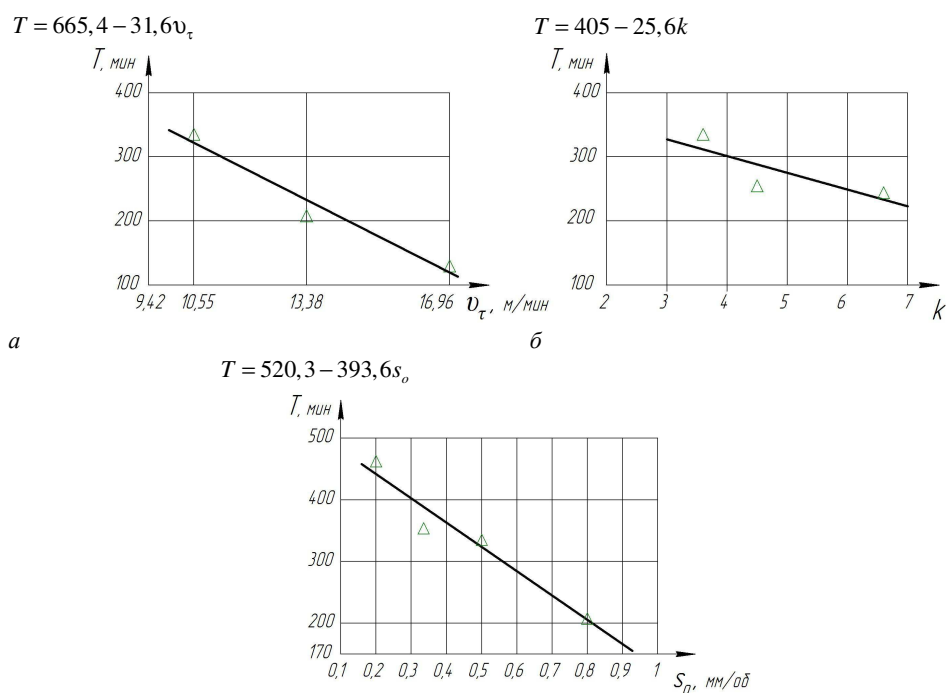
Для уменьшения микроскалывания режущего лезвия и сокращения времени приработки рекомендуется придать ему при заточке начальный радиус округления 0,01–0,03 мм.

Результаты экспериментальных исследований стойкости инструмента при заданных параметрах схемы обработки представлены на рисунке 5. В качестве критерия износа принято появление выступов на обработанной поверхности шириной 0,5 мм.

Увеличение режимов резания приводит к уменьшению стойкости резца. Наибольшее влияние на ее оказывает скорость касательного движения (рисунок 5, а): при изменении v_c от 10,55 до 16,96 м/мин величина T в условиях эксперимента уменьшилась с 335 до 130 мин. При этом увеличение кинематического коэффициента (рисунок 5, б) с 3,6 до 6,6 снижает значение T с 335 до 244 мин.

Уменьшение стойкости с ростом v_c и k связано с повышением скорости трения задней поверхности по поверхности резания, что способствует усилению износа.

С увеличением подачи (рисунок 5, в) стойкость резца уменьшается по причине повышения удельной нагрузки на режущую кромку.



а – от кинематического коэффициента k (при $n_c = 56 \text{ мин}^{-1}$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$);
 б – от скорости вращения резца v_c (при $k = 3,6$; $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$); в – от подачи s_o (при $k = 3,6$; $n_c = 56 \text{ мин}^{-1}$)

Рисунок 5. – Изменение стойкости инструмента ($t = 3 \text{ мм}$)

В меньшей мере на стойкость инструмента влияет глубина резания, что связано с кинематическими особенностями ротационного точения синусоидальных профильных поверхностей принудительно вращающимся эксцентрично установленным круглым резцом [6; 7]. При обработке каждой грани из цилиндрической заготовки за один проход глубина резания вследствие эксцентричной установки резца непрерывно изменяется от минимального до максимального значения и обратно, что не приводит к существенному увеличению температуры, а следовательно, и к значительному снижению стойкости инструмента.

Высокая стойкость резца, которая, например, при обработке трехгранной синусоидальной поверхности средним диаметром 45 мм с кинематическим коэффициентом 3,6, частотой вращения резца 56 мин^{-1} , максимальной глубиной резания 3 мм, подачей 0,5 мм/об составила 335 мин при шероховатости обработанной поверхности 1–2 мкм по параметру R_a , связана с малыми скоростями результирующего движения резания, а также с невысокой температурой рабочих поверхностей режущего лезвия (до $270 \text{ }^\circ\text{C}$ при обработке трехгранных профилей [6]).

Высокое значение кинематического коэффициента способствует быстрому обновлению режущей кромки в зоне резания, что снижает продолжительность ее нагрева, позволяет избежать накопления тепла в инструменте и уменьшает действие тепловых ударов на инструмент, особенно при использовании смазочно-охлаждающей жидкости. В результате количество циклов до развития сколов режущей кромки возрастает, что приводит к повышению и стабилизации стойкости инструмента.

Значения стойкости круглого резца при ротационном точении синусоидальных цилиндрических поверхностей сопоставимы с результатами исследований стойкости пальцевых фрез при обработке поверхностей с РК-3 профилем [8] и превышают в 2–3 раза стойкость дисковых фрез с конструктивной радиальной подачей при обработке поверхностей с РК- и К-профилем [9].

Экспериментальные исследования показали эффективность ротационного точения синусоидальных профильных поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом и позволяют рекомендовать этот способ обработки для промышленной реализации.

Заключение.

1. Изнашивание резца при ротационном точении синусоидальных профильных поверхностей можно разделить на следующие этапы: микроскалывание режущего лезвия, его приработка, образование фаски износа по задней поверхности, округление режущего лезвия, образование на нем выкрашиваний.

2. Изнашивание носит адгезионно-абразивный характер, износ неравномерен вдоль режущей кромки и сопровождается округлением режущего лезвия до 0,25 мм. Задняя поверхность резца более подвержена износу с образованием фаски. Для уменьшения микроскалывания режущего лезвия и сокращения времени приработки рекомендуется придать ему начальный радиус округления 0,01–0,03 мм.

3. В качестве критерия износа ротационного резца целесообразно принять технологический критерий затупления, выражающийся в ухудшении шероховатости обработанной поверхности, образования на ней выступов.

4. Увеличение режимов резания вызывает снижение периода стойкости резца. Наибольшее влияние на нее оказывает скорость касательного движения, наименьшее – глубина резания. Максимальная стойкость резца в условиях проведенного эксперимента составила 450 мин.

5. Определяющим фактором высокой стойкости резца при ротационном точении синусоидальных профильных поверхностей является невысокая температура режущего лезвия и отсутствие значительных перепадов температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.
2. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь ; под ред. Е.Г. Коновалова. – Минск : Наука и техника, 1972. – 272 с.
3. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Н.Н. Попок. – Минск, 1983. – 25 с.
4. Гик, Л.А. Ротационное резание металлов / Л.А. Гик. – Калининград : Книжн. изд-во, 1990. – 254 с.
5. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 71–82.
6. Данилов, В.А. Исследование тепловых явлений при ротационном точении профильных поверхностей с синусоидальным профилем эксцентрично установленным круглым резцом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 48–51.
7. Данилов, В.А. Особенности стружкообразования и экспериментальное определение усадки стружки при ротационном точении синусоидальных поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 65–72.
8. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н.В. Зенин. – М., 2007. – 132 л.
9. Максименко, Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валок с РК- и К-профилем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Ю.А. Максименко ; Юго-Запад. гос. ун-т. – Курск, 2014. – 20 с.

Поступила 01.06.2020

WEAR AND DURABILITY OF THE TOOL AT ROTARY TURNING OF SINUSOIDAL PROFILE SURFACES

V. DANILAU, A. SIALITSKIY

The results of experimental studies of the wear and durability of the cutting blade of a circular cutter fitted out of centre and made of high speed steel when turning sinusoidal profile surfaces are presented. The nature of the cutting blade front and back surfaces wear, the influence of the processing circuit parameters and the cutting mode elements on the durability of the cutter are established, the criterion for its blunting is observed, the factors of high durability of the cutter are identified.

Keywords: sinusoidal profile surface, rotary turning, rotary cutter, wear, wear criteria, durability.

ТРАНСПОРТ

УДК 656.135.2(476.2)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПОЛНЯЕМОСТИ АВТОБУСОВ
ПРИ ГОРОДСКИХ ПЕРЕВОЗКАХ ПассажиРОВ В г. МОГИЛЕВЕ*канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША, Т.В. ГРИЩЕНКО, О.О. ЯСИНСКАЯ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

Степень использования вместимости пассажирских транспортных средств – показатель, влияющий на экономическую составляющую работы перевозчика, а также комфортабельность поездки. Для целей повышения экономической эффективности работы перевозчика необходимо стремиться к максимизации степени использования вместимости. Однако это приведет к снижению комфортности поездки, а следовательно, и качества оказываемой услуги. Поэтому решения по оптимизации степени использования вместимости автобусов (троллейбусов) являются компромиссными и должны подкрепляться соответствующими обоснованиями, которые могут базироваться только на знаниях существующих значений критериев оценки эффективности использования вместимости пассажирских транспортных средств.

Ключевые слова: *общественный транспорт, наполняемость автобусов, пассажирские перевозки, диаграмма размаха.*

Введение. Качество функционирования городского общественного пассажирского транспорта вносит существенный вклад в жизнь современных городов. А его успешность во многом определяется качеством финансирования. В этой связи наполняемость общественного транспорта является важным показателем. Низкие значения наполняемости дают низкую окупаемость перевозок, слишком высокие – резко снижают качество предоставляемых услуг, что может привести к оттоку пассажиров. Поэтому изучение показателей наполняемости и управление ими достаточно актуально. Цель данной работы – рассчитать и проанализировать статистические характеристики случайных величин, характеризующих степень использования вместимости автобусов в г. Могилеве в 2019 г., а также провести сравнение результатов расчетов с ранее выполненными для других городов Республики Беларусь.

Основная часть. Вопросы использования вместимости пассажирских транспортных средств рассматриваются во многих научных трудах. В [1] установлено, что в отношении наполняемости на многих маршрутах действует закон Паретто – на протяжении 80% пути маршрута используется только 20% вместимости автобусов. В [2] подчеркивается, что уровень занятости для автобусов сильно различается между государствами Европейского Союза. Например, в Великобритании автобус перевозит в среднем около 9 человек, в то время как во Франции этот показатель составляет около 25. Эти различия объясняются организацией общественного транспорта, а также формой собственности автобусных предприятий. Подобные исследования для США с такими же выводами приведены в [3] – отмечается низкая эффективность использования вместимости пассажирских транспортных средств. В [4] исследуется уровень наполняемости общественного пассажирского транспорта в Словакии. Авторы указывают, что изменения спроса со стороны пассажиров создают проблемы для перевозчиков, которые принимают решение о назначении для работы на маршруте транспортных средств определенной вместимости. Аналогичные решения принимаются и при закупке пассажирских транспортных средств. Избыточные мощности в пиковое время представляют собой ненужные расходы. Важно, чтобы перевозчик также рассчитывал на небольшую долю неиспользованных мощностей, особенно когда спрос увеличивается. Это позволит удовлетворить новый спрос, а также потенциальных новых пассажиров, которые не будут разочарованы из-за загруженности автобусов. Приемлемый средний уровень занятости в час пик должен составлять 85–90%.

Нами были проанализирована наполняемость троллейбусов на четырех городских троллейбусных маршрутах (Могилев). Общее количество рейсов – 631. Степень использования вместимости за рейс определялась как отношение максимального числа пассажиров в салоне троллейбуса за рейс к вместимости троллейбуса. Степень использования вместимости конкретного выхода (совокупности рейсов, выполняемых по расписанию в одно и то же время, но в разные дни) определялась как максимальная степень использования вместимости всех выполненных выходов. Пример результатов исследования наполняемости приведен на рисунке 1.

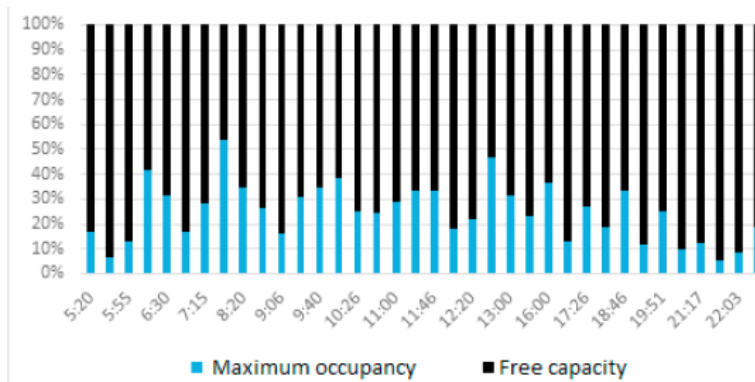


Рисунок 1. – Пример построения графика максимальной вместимости троллейбусов

Источник: [4].

Средняя степень использования вместимости на рассмотренных маршрутах составляет 33,43% для одиночных транспортных средств и 31,83 для сочлененных [4]. Таким образом, целесообразно перераспределение троллейбусов разной вместимости по маршрутам и по выходам. В качестве будущих перспективных способов решения обозначенной в статье проблемы может стать модель, которая будет обновляться в течение определенного периода из-за возможных изменений спроса и инфраструктуры. То есть перевозчик может сократить затраты на осуществление перевозок, реагируя на изменения спроса.

В Республике Беларусь уровень использования вместимости пассажирских транспортных средств невысок [5], при этом коэффициент пассажиронапряженности составляет в среднем 30%, что согласуется с зарубежным опытом, описанным в [4]. Согласно [6], существует значимая неравномерность использования вместимости пассажирских транспортных средств по часам суток и на некоторых маршрутах по направлениям движения. В [7] показано наличие значимого влияния критериев оценки наполняемости пассажирских транспортных средств на экономические показатели работы на маршрутах.

В данной работе степень использования вместимости пассажирских транспортных средств оценивалась следующими критериями:

- средней наполняемостью за рейс (Np), пасс. – отношением выполненных за рейс пассажиро-километров к длине рейса;
- коэффициентом рейсовой вместимости ($Kpвм$) – отношением выполненных за рейс пассажиро-километров транспортной работы к максимально возможной транспортной работе, определяемой произведением вместимости автобуса и расстояния поездки;
- коэффициентом пассажиронапряженности ($Kпн$) – отношением максимального пассажиропотока за рейс (пассажиронапряженности) к вместимости автобуса.

Для расчета значений трех приведенных выше критериев использования вместимости автобусов на некоторых маршрутах г. Могилева в 2019 г. проводилось исследование пассажиропотоков путем непосредственного подсчета учетчиками количества входящих и выходящих пассажиров на каждой остановке. Общее количество обследованных маршрутов – 41, число рейсов – 598. Основные статистические характеристики исследуемых величин приведены в таблице 1.

Оценка описательных статистик показывает, что распределение исследуемых случайных величин отлично от нормального закона, поскольку средние значения исследуемых величин отличны от медианы, стандартные ошибки асимметрии более чем в три раза отличаются от значений асимметрий, равно как и стандартные ошибки эксцесса от значений эксцесса. Для оценки нормальности распределения также были построены гистограммы распределения частот исследуемых величин, их нормальные вероятностные графики и ящичные диаграммы размаха. Все проведенные тесты показали, что распределение исследуемых величин отлично от нормального, что согласуется с проведенными ранее исследованиями для троллейбусных маршрутов г. Могилева в 2018 г. [5]. Из таблицы 1 видно, что средняя наполняемость за рейс – 23,37 пассажира. Эти результаты аналогичны показателю во Франции (25 пасс.) [3].

Результаты подгонки распределения при помощи [8] для исследуемых трех случайных величин по p -значениям критерия Колмогорова – Смирнова, Андерсона – Дарлинга и χ -квадрата приведены в таблице 2. Переменные распределены по законам обобщения экстремальных значений и Джонсона SU. Такие результаты увязываются с полученными данными при анализе перевозок пассажиров троллейбусами в г. Могилеве (2018, 2019) и автобусами в г. Гомеле, Мозыре и в Светлогорске (2018).

Для расчета средних значений показателей использования вместимости автобусов в г. Могилеве (2018, 2019) \bar{x} и их предельной абсолютной ошибки ϵ использовалась методика, приведенная в [5]. Результаты таких расчетов, а также подобных для г. Гомеля, Мозыря и Светлогорска (2018), приведены в таблице 3. Согласно таблице с уменьшением численности жителей города значения всех трех критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств снижаются.

Таблица 1. – Основные статистические характеристики критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Могилеве (2019)

Переменная	Описательные статистики (сведено с данными г. Светлогорска)									
	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка	Асимметрия	Стандартная ошибка асимметрии	Экцесс	Стандартная ошибка эксцесса
<i>Np</i>	23,37	20,67	0,497	71,56	13,402	0,548	0,993	0,0999	0,969	0,1995
<i>Kрвм</i>	0,197	0,177	0,005	0,716	0,119	0,0049	1,1698	0,0999	1,661	0,1995
<i>Kп</i>	0,339	0,3	0,01	1,16	0,194	0,0079	1,025	0,0999	0,9513	0,1995

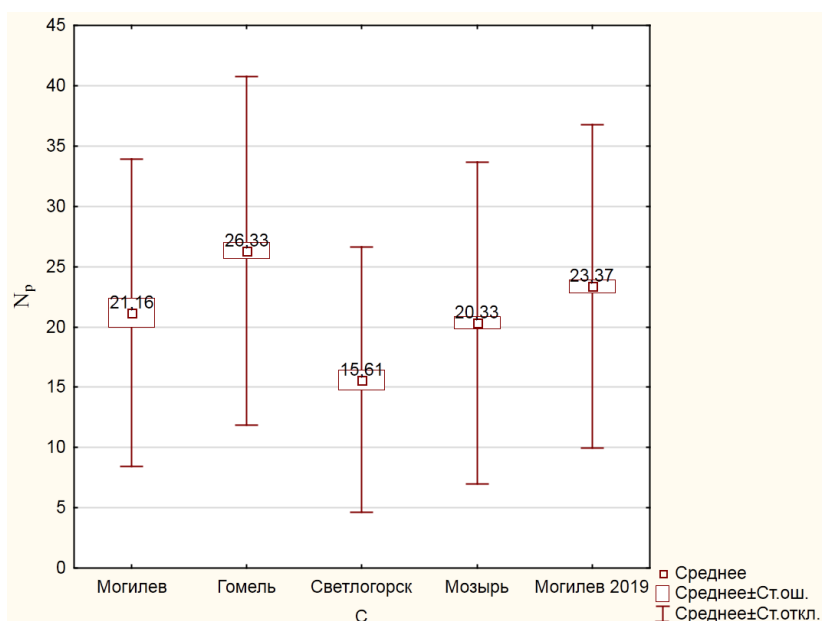
Таблица 2. – Результаты подгонки распределения

Наименование критерия	p-значение критерия		
	Колмогорова – Смирнова	Андерсон – Дарлингга	χ-квадрат
<i>г. Могилев, 2019</i>			
Средняя наполняемость за рейс <i>Np</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент рейсовой вместимости <i>Kрвм</i>	Джонсона SU	Джонсона SU	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент пассажиронапряженности <i>Kп</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
<i>г. Могилев, 2018</i>			
Средняя наполняемость за рейс <i>Np</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Смешанное Гауссовское
Коэффициент рейсовой вместимости <i>Kрвм</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Вейбула
Коэффициент пассажиронапряженности <i>Kп</i>	Джонсона SU	Обобщение экстремальных значений	Релея
<i>г. Светлогорск</i>			
Средняя наполняемость за рейс <i>Np</i>	Смешанное Гауссовское	Смешанное Гауссовское	Смешанное Гауссовское
Коэффициент рейсовой вместимости <i>Kрвм</i>	Обобщение экстремальных значений	Смешанное Гауссовское	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент пассажиронапряженности <i>Kп</i>	Смешанное Гауссовское	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
<i>г. Гомель</i>			
Средняя наполняемость за рейс <i>Np</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент рейсовой вместимости <i>Kрвм</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент пассажиронапряженности <i>Kп</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Джонсона SU
<i>г. Мозырь</i>			
Средняя наполняемость за рейс <i>Np</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент рейсовой вместимости <i>Kрвм</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений
Коэффициент пассажиронапряженности <i>Kп</i>	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений	Обобщение экстремальных значений

Таблица 3. – Сравнение степени использования вместимости пассажирских транспортных средств в г. Могилеве, Гомеле, Мозыре и Светлогорске

Город	Население, тыс. чел.	Объем выборки, рейсов	Средняя наполняемость за рейс (Np), пасс.		Коэффициент рейсовой вместимости ($Kpvm$), %		Коэффициент пассажиронапряженности ($Kп$), %	
			\bar{x}	ϵ	\bar{x}	ϵ	\bar{x}	ϵ
Могилев, 2019	383,3	598	23,37	1,31	19,7	1,17	33,9	3,3
Гомель	536,6	485	26,33	2,58	17,33	1,7	30,14	3
Могилев, 2018	382,3	110	21,16	3	17,2	2	30	2
Светлогорск	67,3	178	15,61	2,34	15,32	2,3	27,92	4,2
Мозырь	111,8	659	20,33	1,31	19,1	1,3	27,7	1,7

Диаграмма размаха значений средней наполняемости за рейс по четырем рассматриваемым выборкам приведена на рисунке 2. Для оценки значимости различий в критериях оценки степени использования вместимости для трех городов применялись дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса, медианный тест и сравнение средних рангов всех групп, реализованные в [8]. Их результаты позволяют сделать вывод о значимости различий в средних значениях трех анализируемых критериев оценки степени использования вместимости по всем статистическим критериям. Все критерии оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств (Np , $Kpvm$, $Kп$) в пяти рассмотренных выборках значимо отличаются друг от друга.

Рисунок 2. – Диаграмма размаха значений переменной Np для г. Гомеля, Могилева, Мозыря и Светлогорска

Также была выдвинута гипотеза о значимости различий приведенных выше трех критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Могилеве (2019) на каждом маршруте по дням недели, маршрутам, часам суток и направлениям движения. При оценке значимости различий по маршрутам, часам суток и дням недели использовались дисперсионный анализ Краскела – Уоллеса, медианный тест, сравнение средних рангов для всех групп, реализованные в [8]. При оценке значимости различий по направлениям движения на каждом маршруте использовались тест Вальда – Вольфовица, Колмогорова – Смирнова, U -тест Манна – Уитни, реализованные в [8].

На рисунке 3 приведена диаграмма размаха значений средней наполняемости за рейс Np по маршрутам. Минимальное значение средней наполняемости за рейс составляет 4,9 пасс. (маршрут 50), максимальное – 33,3 пасс. (маршрут 28).

Результаты расчетов показывают, что по маршрутам движения имеются значимые различия всех трех критериев оценки степени использования вместимости автобусов по всем трем статистическим

тестам. Аналогичные результаты были получены при исследовании в г. Гомеле, Мозыре и Светлогорске. Для г. Могилева (2018; рассматривались троллейбусные маршруты) было установлено отсутствие значимости в таких различиях по маршрутам движения.

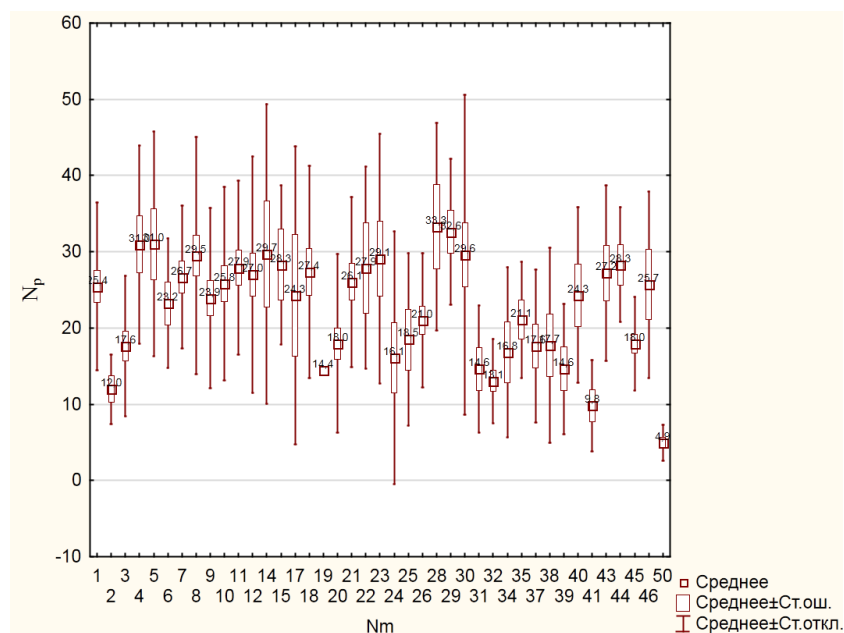


Рисунок 3. – Диаграмма размаха значений переменной N_p для г. Могилева (2019) по маршрутам

На рисунке 4 приведена диаграмма размаха значений средней наполняемости за рейс по дням недели. Максимальное значение средней наполняемости за рейс наблюдается в среду и составляет 25,3 пасс., минимальное – в воскресенье, 14,1 пасс.

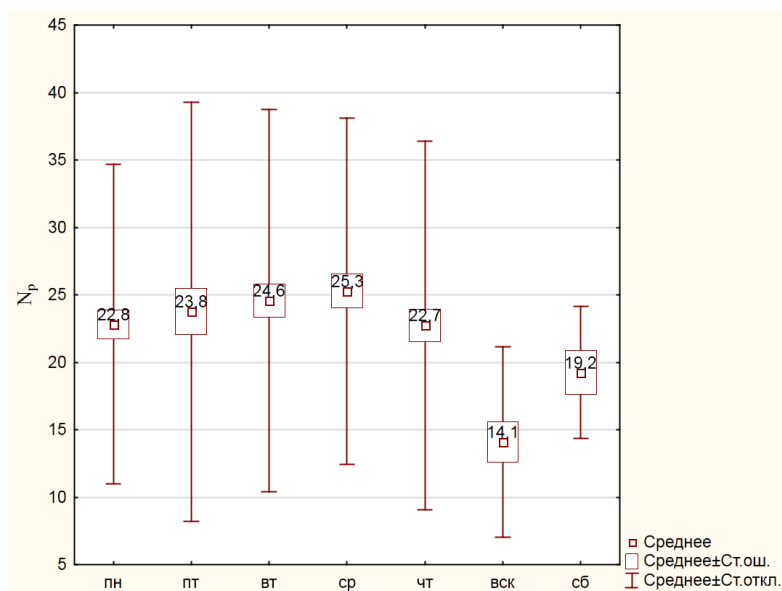


Рисунок 4. – Диаграмма размаха значений переменной N_p для г. Светлогорска по дням недели (будний и выходной)

На рисунке 5 приведены результаты сравнения значений N_p попарно для всех дней недели. Существенны различия значений N_p для воскресенья по сравнению с остальными днями, кроме пятницы. Значения N_p в пятницу незначимо отличаются от значений этой же переменной в каждый из остальных дней.

Для анализируемых данных в г. Могилеве (2019) выводы, согласно рисункам 4 и 5, для переменной N_p аналогичны и для остальных переменных, выбранных в качестве критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств. Результаты аналогичных вычислений, выполненных для г. Мозыря, показывают, что по дням недели значения N_p и K_n незначимо отличаются друг от друга, а K_{pkm} – значимо по ранговому дисперсионному анализу Краскела – Уоллиса.

Зависим.: N_p	р знач. (2-сторонние) для множеств. сравнений; N_p (Могилев) Груп. (независ.) переменная: Day Кр.Краскела-Уоллиса: $H(6, N=598) = 17,85371$ $p = 0,0066$						
	пн	пт	вт	ср	чт	вск	сб
	R:299,72	R:292,14	R:312,61	R:330,22	R:290,93	R:167,23	R:262,56
пн		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,019389	1,000000
пт	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	0,053285	1,000000
вт	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000	0,005638	1,000000
ср	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,001188	1,000000
чт	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000		0,040579	1,000000
вск	0,019389	0,053285	0,005638	0,001188	0,040579		1,000000
сб	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	

Рисунок 5. – Сравнение значимости различий переменной N_p между каждой парой дней недели

На рисунке 6 приведена диаграмма размаха значений средней наполняемости за рейс по часам суток. Минимальное значение средней наполняемости за рейс составляет 5,4 пасс. и наблюдается в период с 23 до 24 ч. Максимальное значение этого критерия наблюдается в период с 7 до 8 ч. и составляет 30,7 пасс. Аналогичные экстремальные периоды суток были получены для г. Мозыря и Могилева (2018).

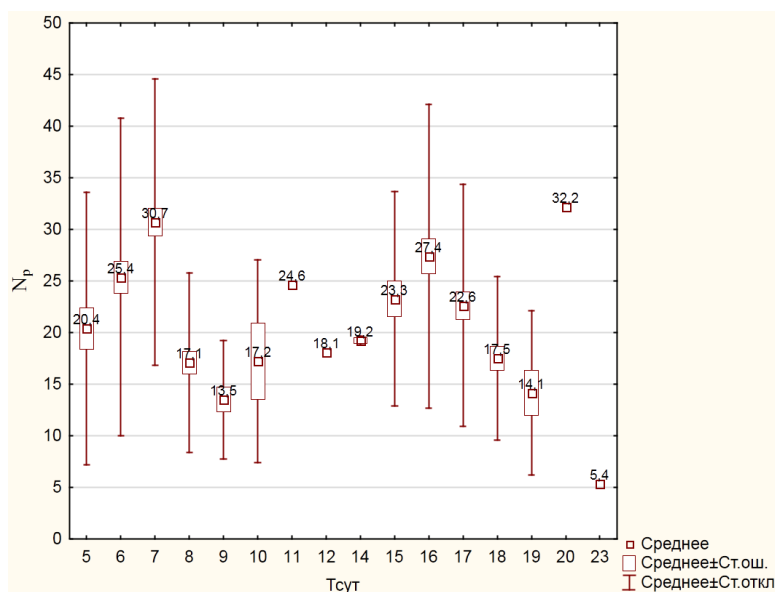


Рисунок 6. – Диаграмма размаха значений переменной N_p для г. Могилева (2019) по часам суток

Результаты расчетов показывают, что значения всех трех критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств значимо отличаются по часам суток по всем использованным статистическим характеристикам. Такие результаты согласуются с аналогичными вычислениями для г. Могилева (2018), в которых также была установлена значимость различий в критериях оценки степени вместимости по часам суток по двум из трех тестов – дисперсионному анализу Краскела – Уоллиса и сравнению средних рангов для всех групп, а также для г. Гомеля и Мозыря, где значения всех трех критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств значимо отличаются по часам суток по всем использованным статистическим характеристикам.

Кроме того, была проанализирована значимость различий критериев оценки степени использования вместимости автобусов по направлениям движения на маршрутах. Результаты такой оценки представлены в таблице 5.

Согласно таблице 5, имеются значимые различия в значениях всех критериев оценки степени использования вместимости на маршрутах 5 и 24 по всем критериям оценки значимости. Для маршрута 32 значимы различия только в значении коэффициента пассажиронапряженности $Kп$ и только по критерию Манна – Уитни. Такой результат аналогичен результату, полученному в г. Могилеве (2018), Мозыре и Гомеле, где такие различия были установлены для некоторых маршрутов. В то же время анализ значимости различий значений критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Светлогорске по направлениям движения на каждом маршруте показал, что значимых различий не имеется.

Таблица 5. – Результаты расчета значимости различий между критериями использования вместимости на разных маршрутах по направлениям движения (фрагмент)

№ маршрута	Критерии оценки	Выдвигаемая гипотеза		
		значения критериев использования вместимости на маршруте значимо различаются по направлениям движения		
		Np	$Kpвм$	$Kп$
5	критерий серий Вальда – Вольфовица	+	+	+
	критерий Колмогорова – Смирнова	+	+	+
	критерий Манна – Уитни	+	+	+
24	критерий серий Вальда – Вольфовица	+	+	+
	критерий Колмогорова – Смирнова	+	+	+
	критерий Манна – Уитни	+	+	+
32	критерий серий Вальда – Вольфовица	–	–	–
	критерий Колмогорова – Смирнова	–	–	–
	критерий Манна – Уитни	–	–	+

Заключение. Проведенная аналитическая работа позволила определить статистические характеристики критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Могилеве по данным обследования в 2019 г. Их средние значения достаточно низки и составляют:

- средняя наполняемость за рейс Np – 23,37 пасс.;
- коэффициент рейсовой вместимости $Kpвм$ – 19,7%;
- коэффициент пассажиронапряженности $Kп$ – 33,9%.

Установлено, что имеется значимое изменение (рост) значений критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств с ростом численности населения города, в котором проводилось обследование.

Анализ изменения значений критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Могилеве по дням недели, маршрутам, часам суток и направлениям движения на каждом маршруте показал, что:

1. По маршрутам движения имеются значимые различия всех трех критериев оценки степени использования вместимости автобусов по всем трем статистическим тестам. Аналогичные результаты были получены при исследовании в г. Гомеле, Мозыре и Светлогорске. Для г. Могилева (2018; рассматривались троллейбусные маршруты) было установлено отсутствие значимости в таких различиях по маршрутам движения. Минимальное значение средней наполняемости за рейс составляет 4,9 пасс. (маршрут 50), максимальное – 33,3 пасс. (маршрут 28).

2. Максимальное значение средней наполняемости за рейс наблюдается в среду и составляет 5,3 пасс., минимальное – в воскресенье, 14,1 пасс. Существенны различия значений Np для воскресенья по сравнению со всеми остальными днями, кроме пятницы. Значения Np в пятницу незначимо отличаются от значений этой же переменной в каждый из остальных дней. Для анализируемых данных, полученных в г. Могилеве (2019), выводы для переменной Np аналогичны и для остальных переменных, выбранных в качестве критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств. Результаты подобных вычислений, выполненных для г. Мозыря, показывают, что по дням недели значения Np и $Kп$ незначимо отличаются друг от друга, а $Kpвм$ – значимо по ранговому дисперсионному анализу Краскела – Уоллиса.

3. Минимальное значение средней наполняемости за рейс составляет 5,4 пасс. и наблюдается в период с 23 до 24 ч. Максимальное значение этого критерия наблюдается в период с 7 до 8 ч и составляет 30,7 пасс. Аналогичные экстремальные периоды суток были получены для г. Мозыря и Могилева (2018). Значения всех трех критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств значимо отличаются по часам суток по всем использованным статистическим характеристикам. Такие результаты согласуются с аналогичными вычислениями для г. Могилева (2018), в которых также была установлена значимость различий в критериях оценки степени вместимости по часам суток по двум из трех тестов – дисперсионному анализу Краскела – Уоллиса и сравнению средних рангов

для всех групп, а также для г. Гомеля и Мозыря, где значения всех трех критериев оценки степени использования вместимости пассажирских транспортных средств значимо отличаются по часам суток по всем использованным статистическим характеристикам.

4. Имеются значимые различия в значениях всех критериев оценки степени использования вместимости на маршрутах 5 и 24 по всем критериям оценки значимости. Для маршрута 32 значимы различия только в значении коэффициента пассажирапряженности $Kп$ и только по критерию Манна – Уитни. Результат аналогичен результату, полученному в г. Могилеве (2018), Мозыре и Гомеле, где такие различия были установлены для некоторых маршрутов. В то же время анализ значимости различий значений критериев оценки степени использования вместимости автобусов в г. Светлогорске по направлениям движения на каждом маршруте показал, что не имеется значимых различий.

Таким образом, значения критериев оценки степени использования вместимости невысоки, что говорит о низкой эффективности использования вместимости. Значимая вариативность критериев оценки степени использования вместимости по маршрутам, часам суток, дням недели и направлениям движения показывает целесообразность применения научных подходов к совершенствованию методики назначения пассажирских транспортных средств разной вместимости на маршруты и конкретные рейсы с учетом мощности имеющегося пассажиропотока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Traveling heterogeneity in public transportation / Caio Ponte [et al.]. – Mode of access: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6>.
2. Adra, N. Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport / N. Adra, J.L. Michaux, Michel Andre // Artemis: assessment and reliability of transport emission models and inventory systems : Rapport de recherche. – 2004. – 31 p. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_-_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems.
3. Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time. – Mode of access: https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf.
4. Medviďa, Peter. Occupancy of Public Transport Vehicles in Slovakia / Peter Medviďa, Marián Gogolaa and Stanislav Kubaláka, // Transportation Research Procedia (2020). – 44. – P. 153–159. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/340070494_Occupancy_of_Public_Transport_Vehicles_in_Slovakia.
5. Azemsha, S. The Study of the Trolley Buses Occupancy / S. Azemsha // Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management. – 2019. – Vol. 19, Is. 1, Version 1.0. – P. 6–15.
6. Аземша, С.А. Оценка неравномерности использования вместимости общественного пассажирского транспорта / С.А. Аземша // Логистический аудит транспорта и цепей поставок : материалы II междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 26 апр. 2019 г. / отв. ред. С.А. Эртман. – Тюмень : ТИУ, 2019. – С. 16–23.
7. Аземша, С.А. Разработка предложений по повышению эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта / С.А. Аземша // Вестн. СибАДИ. – 2019. – Вып. 16 (5). – С. 544–557.
8. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

Поступила 01.06.2020

RESEARCH BUSES OCCUPANCY RATE IN MOGILEV

S. AZEMSHA, T. HRYSHCHANKA, V. YASINSKAYA

Public transport occupancy rate is an indicator that affects the economic component of the carrier's work, as well as the comfort of the trip for passengers. In order to increase the economic efficiency of the carrier, it is necessary to strive to maximize the public transport occupancy rate. However, this will lead to a decrease in the comfort of the trip, and, consequently, in the quality of the service provided. Therefore, decisions to optimize the buses (trolleybuses) occupancy rate are compromise and must be supported by appropriate justifications, which can only be based on knowledge of the existing values of the criteria for assessing the public transport occupancy rate.

Keywords: public transport, bus occupancy rate, passenger traffic, scale diagram.

УДК 656.13

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОКУПАЕМОСТИ РАБОТЫ
ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА
РЕГУЛЯРНОГО СООБЩЕНИЯ**

канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель),
д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Важность общественного транспорта в структуре городской мобильности трудно переоценить. Он выполняет основную долю транспортной работы по перевозке пассажиров. В то же время экономическая составляющая такой работы оставляет желать лучшего: общественный транспорт субсидируем. Одним из основных экономических показателей работы общественного транспорта является его окупаемость – отношение выручки от работы общественного транспорта к затратам на его функционирование. В данной работе окупаемость работы автобусов на городских маршрутах ряда городов Республики Беларусь рассматривается как случайная величина. К исследуемой случайной величине применены стандартные статистические методы обработки данных.

Ключевые слова: *пассажирские перевозки, общественный транспорт, окупаемость работы, статистическая обработка данных.*

Общественный пассажирский транспорт играет стратегическую роль в жизни городов. Это приводит к необходимости повышения ценовой доступности его услуг и, как следствие, субсидирование его работы из бюджета. Объем выделяемых при этом бюджетных средств существенен. Так, предварительные расчеты для города населением 65 тыс. чел. показывают, что суммарные расходы на функционирование автобусного парка составляют 1,83 млн долл./год. При сложившемся уровне самоокупаемости 75,8% нетрудно посчитать, что ежегодно из бюджета будут выделяться субсидии в размере порядка 443,8 тыс долл./год. Несомненно, размер дотаций будет увеличиваться пропорционально росту численности жителей населенного пункта. В таких условиях разработка мероприятий, направленных на повышение окупаемости работы городского общественного пассажирского транспорта, является актуальной.

Проблеме анализа окупаемости работы перевозчиков в научной литературе уделено немало внимания. Так, в работе [1] предлагаются мероприятия по управлению доходностью перевозок пассажиров железнодорожным транспортом, т.е. создание условий по повышению наполняемости вагонов. Авторы на основании имеющихся данных создают модель для оценки значения точки безубыточности при различных значениях управляемых факторов, а также оценивают соответствующие риски. В работе [2] приводится описание автоматизированной системы управления рентабельностью. Суть ее работы – оптимизация тарифов и структуры состава поезда под существующий пассажиропоток с целью максимизации доходов перевозчика. В работе [3] аналогичная задача решается методом комплексной автоматизации. Следует отметить, что централизация всей информации на базе одного предприятия – железной дороги – позволяет собрать необходимую статистику. В условиях перевозки пассажиров различными автомобильными перевозчиками сбор такой информации затруднен. Кроме того, предлагаемые мероприятия непросто реализовать для автомобильного транспорта (например, ограничены возможности для изменения длины и вместимости автобусов и троллейбусов).

Применительно к автомобильным перевозкам в работе [4] установлены основные проблемы функционирования автомобильного пассажирского транспорта: высокая степень износа основных фондов, неэффективное тарифное регулирование, низкий уровень инвестиций, высокая текучесть кадров на предприятиях. Справиться с трудностями авторы предлагают за счет реализации государственно-частного партнерства, оптимизации маршрутной сети, создания конкуренции между перевозчиками, снижения льготирования перевозок и т.д. Очевидно, что основным триггером из перечисленных проблем является низкая окупаемость (рентабельность) перевозок. И с решением именно этой проблемы так или иначе связаны все перечисленные авторами мероприятия. Бесспорно, немалую роль в повышении доходов автомобильных перевозчиков играет величина тарифа. В работе [5] приведены расчеты по формированию тарифов. Однако стоит отметить, что рост тарифов автоматически приводит к снижению спроса. Кроме того, предложенный в [5] подход к формированию тарифов не позволяет обеспечить управление доходностью, а просто основан на покрытии затрат перевозчиков. Предложенные в [1–3] железнодорож-

никами подходы по формированию тарифов в зависимости от спроса могли бы сгладить неравномерность пассажиропотока по часам, а следовательно, и улучшить использование имеющихся основных средств, повысить рентабельность перевозок. Известны попытки снижения затрат на перевозку пассажиров путем замены имеющегося парка транспортных средств на автобусы, работающие на газобаллонном топливе. Однако, как показано в [6], более высокая стоимость таких автобусов в итоге нивелирует все преимущества в стоимости газа по сравнению с дизельным топливом. В работе [7] предложено снижение затрат за счет оптимального распределения транспортных средств различной вместимости по маршрутам и по часам суток в соответствии с мощностью пассажиропотока. Но для реализации подобных мероприятий перевозчик должен иметь парк транспортных средств различной вместимости и необходимые мощности для его обслуживания. Кроме того, в работе [8] предлагается отменить ряд остановок на маршруте из-за небольшого пассажирообмена на них и для повышения скорости перевозки. В работе [9] рассмотрена выборка значений самокупаемости за каждый месяц 2019 г. на каждом городском маршруте населенного пункта численностью 381 тыс чел. Общий объем выборки составил 492 наблюдения. Среднее значение выборки – 62,12, медиана – 61,9, стандартное отклонение – 15,74. Анализ нормальности распределения исследуемой случайной величины показал, что по большинству тестов распределение исследуемой случайной величины отличается от нормального; анализ значимости различий в значениях окупаемости по разным маршрутам – что такие различия значимы; аналогичный анализ по месяцам года – что несмотря на визуальные различия значений окупаемости по месяцам года эти различия не значимы.

В данной статье на примере ряда государственных перевозчиков в некоторых городах Республики Беларусь как случайная величина рассматривается окупаемость работы пассажирских транспортных средств на городских маршрутах – устанавливаются закономерности и тенденции ее изменения, а также определяются возможные пути роста самокупаемости.

Для достижения поставленной цели в исследовании рассмотрена выборка значений окупаемости на автобусных маршрутах автобусного парка г. Гомеля в 2018 и 2019 гг., а также автобусных парков г. Могилева и Речицы. Основные статистические характеристики выборки приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные статистические характеристики значений самокупаемости за каждый месяц 2019 г на каждом городском маршруте населенного пункта численностью 381 тыс. чел.

Город	Описательные статистики (Могилев по месяцам)									
	№ наблюдения	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Асимметрия	Стандартная ошибка асимметрии	Экссесс	Стандартная ошибка эксцесса
Итого	171	0,672	0,676	0,217	1,035	0,150	-0,206	0,186	-0,261	0,369
Могилев	41	0,612	0,610	0,353	1,035	0,154	0,414	0,370	-0,011	0,724
Гомель, 2019	59	0,700	0,690	0,346	0,951	0,136	-0,353	0,311	-0,216	0,613
Гомель, 2018	64	0,687	0,680	0,349	0,952	0,138	-0,208	0,299	-0,559	0,590
Речица	7	0,654	0,634	0,217	0,998	0,259	-0,467	0,794	0,218	1,587

Таким образом, (см. таблицу 1) общий размер изучаемой выборки составляет 171 наблюдение. Максимальное число наблюдений составляет 64 маршрута в г. Гомеле в 2018 г., минимальное – 7 маршрутов в Речице. Минимальное значение самокупаемости составляет 21,7% в г. Речице, максимальное – 1,035 в Могилеве. При этом среднее значение окупаемости для всей выборки равно 67,2%. Также видно, что среднее и медиана для всех рассмотренных выборок незначительно отличаются друг от друга, что является косвенным признаком нормальности распределения исследуемых величин. Еще одним признаком того, что исследуемая случайная величина подчиняется нормальному закону распределения, является соотношения между асимметрией и стандартной ошибкой асимметрии, а также эксцессом и стандартной ошибкой эксцесса. Известно, что если модуль указанных соотношений не превышает трех, то рассматриваемая случайная величина подчинена нормальному закону распределения. Как видно, соотношение между асимметрией и стандартной ошибкой асимметрии не превышает трех. Соотношение между эксцессом и стандартной ошибкой эксцесса чуть превышает допустимый предел (г. Речица и Могилев).

На рисунке 1 приведены гистограммы распределения исследуемых случайных величин, полученные при помощи [10], а также числовые значения ряда статистических критериев. По форме гистограмм видно, что они недостаточно хорошо описываются теоретической кривой Гаусса. Уровень значимости критерия Колмогорова – Смирнова меньше 0,2, что говорит о необходимости отклонения гипотезы о нормальном распределении исследуемых случайных величин.

На рисунке 2 приведены нормальные вероятностные графики исследуемых величин. Согласно графикам фактические данные имеют некоторые отклонения от теоретической кривой, хотя эти отклонения и не систематические.

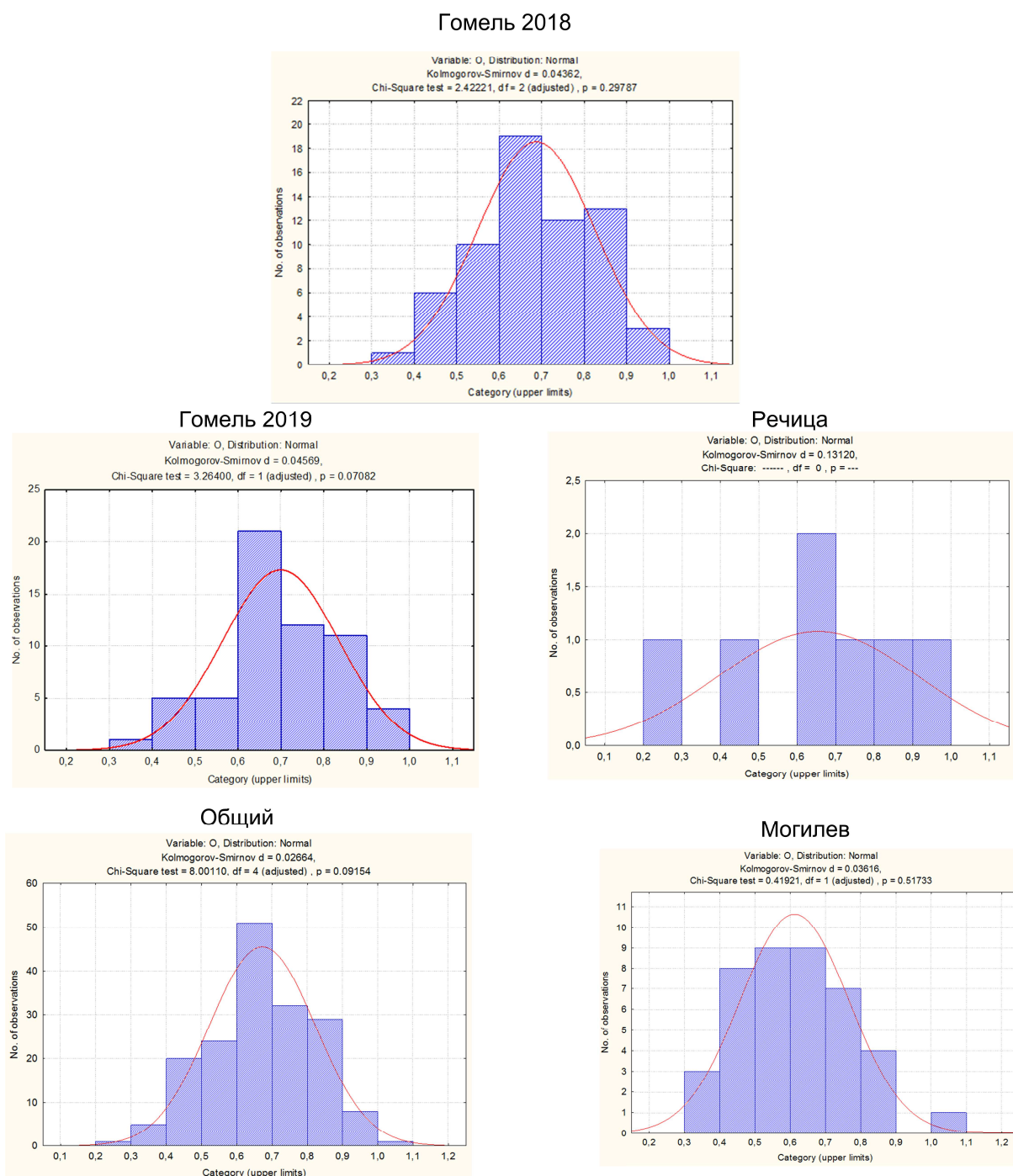


Рисунок 1. – Гистограмма распределения значений самоокупаемости

Для оценки нормальности распределения исследуемых величин также были построены ящичные диаграммы (рисунок 3). На них усы не симметричны относительно медианы, а также имеется ряд выбросов. Все это свидетельствует о том, что переменные распределены по законам, отличным от нормального.

Таким образом, проведенная оценка нормальности распределения окупаемости работы на маршрутах как отдельно по каждому городу, так и для всех городов вместе, показывает, что исследуемые случайные величины имеют распределение, отличное от нормального. Это будет учтено при выборе методов анализа данных в дальнейшем.

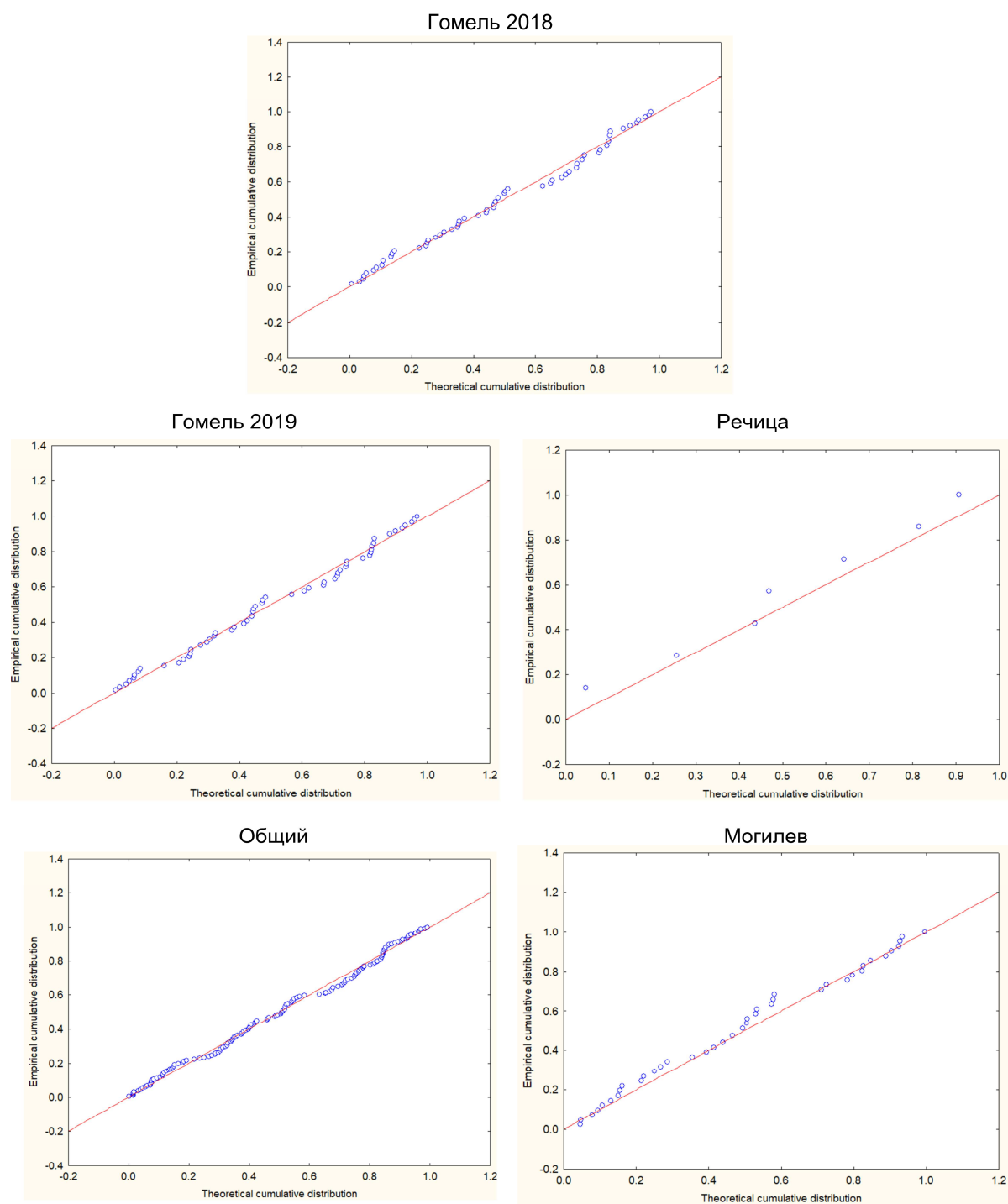


Рисунок 2. – Нормальные вероятностные графики распределения случайных величин

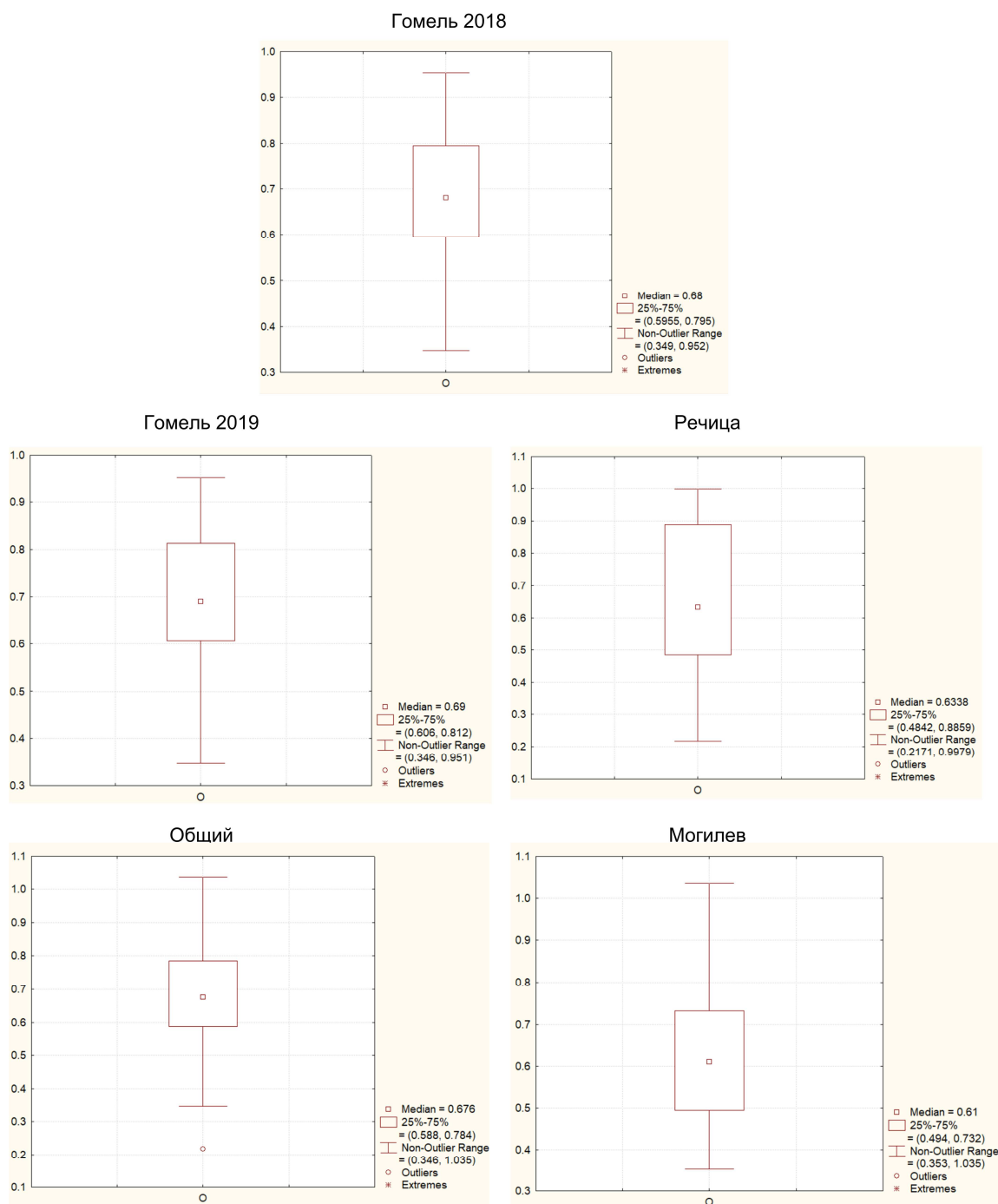
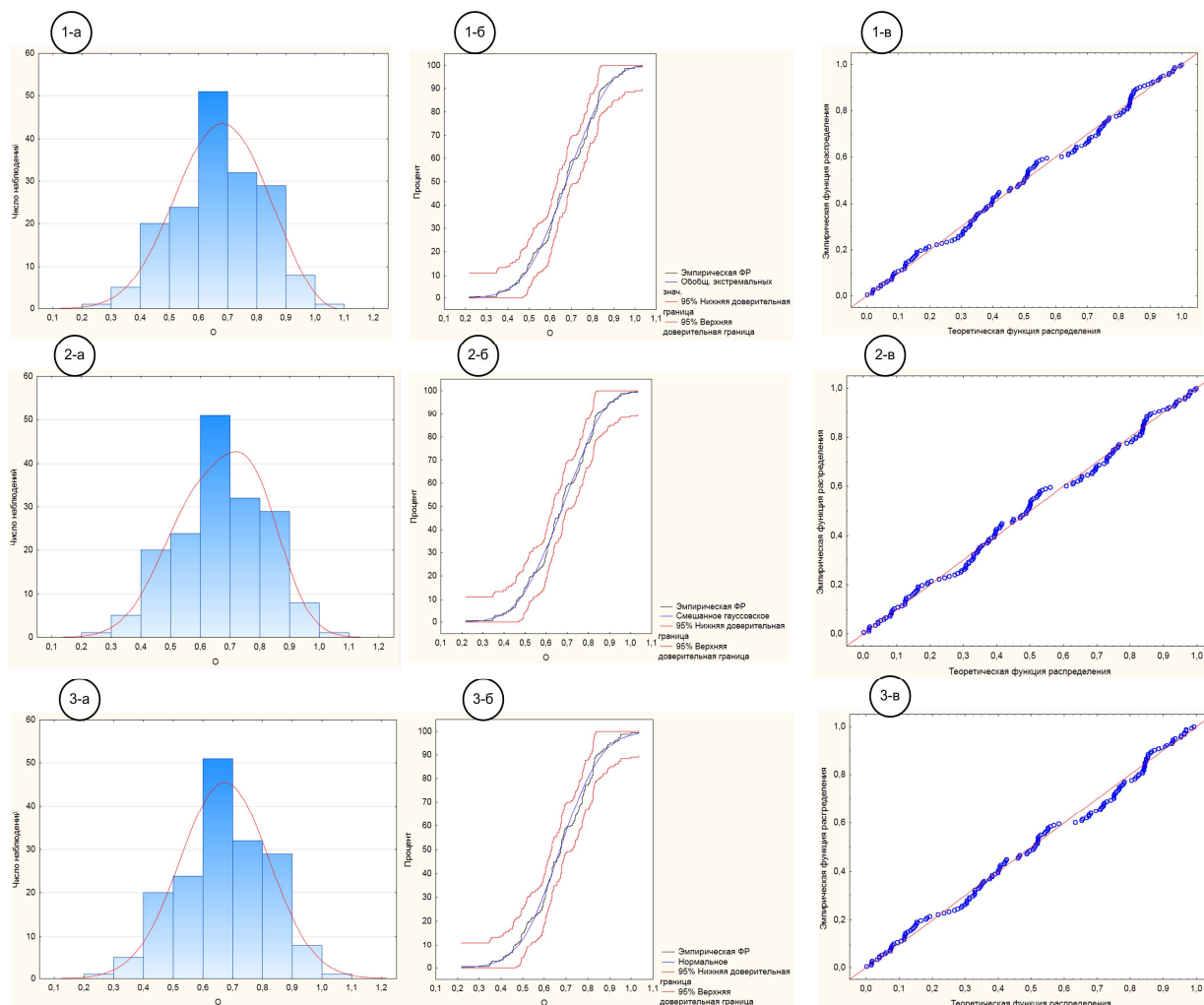


Рисунок 3. – Ящичная диаграмма распределения исследуемых случайных величин

Проведенный при помощи [10] подбор закона распределения для исследуемой случайной величины, в общем для всех городов, показал (рисунок 4):

- по критерию Колмагорова – Смирнова наилучшей подгонкой является обобщенное распределение экстремальных значений;
- по критерию Андерсона – Дарлинга наилучшей подгонкой является смешанное Гауссовское распределение;
- по критерию χ -квадрат наилучшей подгонкой является нормальное распределение.



**1 – обобщенное распределение экстремальных значений;
2 – смешанное Гауссовское распределение; 3 – нормальное распределение;
а – гистограмма распределения с подгонкой; б – эмпирическая функция распределения;
в – график вероятность-вероятность**

Рисунок 4. – Результаты определения закона распределения случайной величины

При анализе значимости различий в значениях окупаемости между всеми выборками городов (рисунок 5) были использованы непараметрические методы: дисперсионный анализ Краскелла – Уоллеса, медианный тест, сравнение средних рангов групп, реализованные в [10], которые показали наличие значимых различий только между значениями самоокупаемости между выборками, полученными в г. Гомеле (2019) и в Могилеве.

Для оценки значимости различий окупаемости между каждой парой выборок использовались следующие непараметрические методы: тест Вальда – Вольфовица, тест Колмогорова – Смирнова и U -тест Манна – Уитни, реализованные в [10]. По результатам вычислений имеются значимые различия значений самоокупаемости между парами выборок Гомель (2019) – Могилев, Гомель (2019) – Гомель (2018), Гомель (2018) – Могилев.

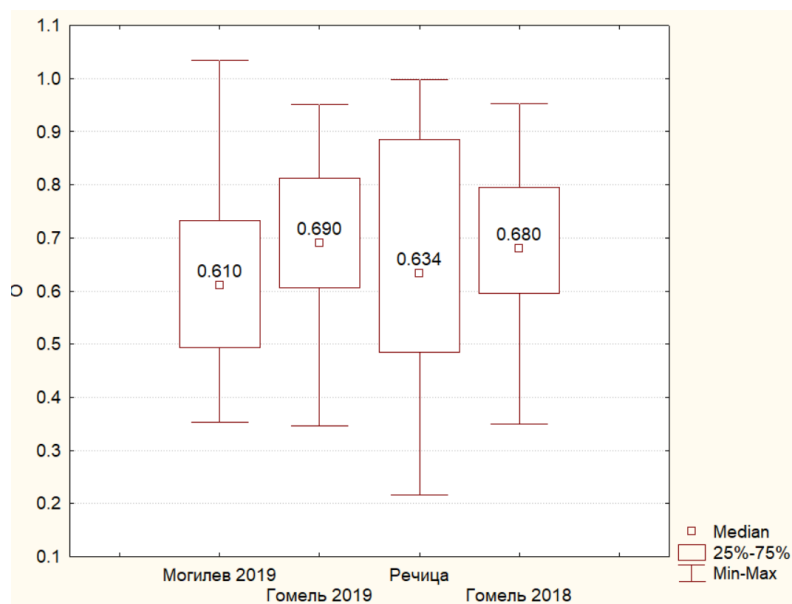


Рисунок 5. – Ящичные диаграммы распределения исследуемых случайных величин

Заключение. В данной статье рассматривались параметры случайных величин, показывающих самокупаемость работы автобусов на городских маршрутах в трех населенных пунктах Республики Беларусь. Согласно проведенному анализу:

1. Значения самокупаемости работы на маршрутах в каждом рассмотренном городе, а также во всех городах в совокупности по большинству статистических тестов распределены по закону, отличному от нормального.
2. Среднее значение самокупаемости работы на маршруте в рассмотренных городах составило 67,2%.
3. Различия в значениях самокупаемости работы на маршрутах разных городов в целом незначимы.
4. Имеются значимые различия значений самокупаемости между парами выборок Гомель (2019) – Могилев, Гомель (2019) – Гомель (2018), Гомель (2018) – Могилев.

Такие результаты совместно с результатами, полученными в [9], дают направления поиска путей повышения окупаемости работы городского общественного пассажирского транспорта регулярного сообщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краковский, Ю.М. Управление доходностью перевозки пассажиров на основе вероятностного анализа безубыточности [Электронный ресурс] / Ю.М. Краковский, Д.И. Жарий, А.С. Селиванов. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17104325_47011239.pdf. – Дата доступа: 01.03.2020.
2. Повышение эффективности пассажирских перевозок на базе автоматизированной системы управления рентабельностью [Электронный ресурс] / О.Ф. Мирошниченко [и др.]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17231631_91488015.pdf. – Дата доступа: 01.03.2020.
3. Венедиктов, Г.Л. Повышение рентабельности пассажирских железнодорожных перевозок методом комплексной оптимизации [Электронный ресурс] / Г.Л. Венедиктов, В.М. Кочетков. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20386564_31990182.pdf. – Дата доступа: 01.03.2020.
4. Шмарин, А.А. Анализ основных проблем функционирования автомобильного пассажирского транспорта [Электронный ресурс] / А.А. Шмарин, А.П. Шмарин. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24113259_55278451.pdf. – Дата доступа: 01.03.2020.
5. Фадеев, Д.С. Определение тарифа на перевозку пассажиров городским общественным транспортом в городе Иркутске [Электронный ресурс] / Д.С. Фадеев, М.А. Моисеева. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25286071_44415719.pdf. – Дата доступа: 03.03.2020.
6. Евстифеев, А.А. Влияние холостых пробегов газовых городских автобусов на показатели производственно-хозяйственной деятельности [Электронный ресурс] / А.А. Евстифеев, А.Е. Ермолаев. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26630616_33025643.pdf. – Дата доступа: 03.03.2020.
7. Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава [Электронный ресурс] / В.Е. Гоз-

- бенко [и др.]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29817843_60948769.pdf. – Дата доступа: 03.03.2020.
8. Повышение эффективности транспортного обслуживания населения г. Тюмени (на примере маршрута № 10) [Электронный ресурс] / Ю.С. Вохминцева [и др.]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_27563418_27325112.pdf. – Дата доступа: 20.08.2020.
9. Грищенко, Т.В. / Анализ окупаемости работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения / Т.В. Грищенко, О.О. Ясинская, С.А. Аземша // Логистический аудит транспорта и цепей поставок : материалы III междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 28 апр. 2020 г. / отв. ред. С.А. Эртман. – Тюмень: ТИУ, 2020. – С. 61–67.
10. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

Поступила 01.06.2020

**STATISTICAL STUDY OF RETURN OF WORK
CITY PASSENGER TRANSPORT
REGULAR MESSAGES**

S. AZEMSHA, D. KAPSKIY

The importance of public transport in the structure of urban mobility can hardly be overestimated. This type of transport performs the lion's share of transport work for the transportation of passengers. At the same time, the economic component of such work leaves much to be desired: we subsidize public transport. One of the main economic indicators of public transport is its payback - the ratio of revenue from public transport to the cost of its operation.

In this article, the payback of buses on urban routes of a number of cities in the Republic of Belarus is considered a random variable. Standard statistical methods of data processing are applied to the investigated random variable.

Keywords: *passenger transportation, public transport, payback of work, statistical data processing.*

УДК 629.3.082.2(075.8)

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ КУРСА
«ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА»**

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Определены содержание, структура и методические особенности курса по проектированию предприятий автомобильного транспорта, цель которого – обеспечить будущего специалиста знаниями и умениями, достаточными для разработки планировки производственного участка и компоновки производственного корпуса высокого технического уровня.

Совершенствование материала курса предполагает уточнение места проектирования предприятий и его частей в системе проектирования объектов производства различных видов. С учетом опыта изложения курса определены направления совершенствования его материала, подчиненные уточненной цели. Описаны методические особенности курса, выделены роль и значимость реконструкции и технического перевооружения частей предприятия, представлена оптимизация технического решения на основе геометрического моделирования с построением эпюры грузопотоков. Определены условия внедрения поточной организации различных производственных участков. Впервые представлен выбор композиционных центров при разработке компоновки производственного корпуса. Приведены на стадии проектирования мероприятия по технической эстетике предприятия. Рекомендована оценка технического уровня проектных решений с помощью карты технического уровня.

Ключевые слова: *автотранспортное предприятие, система содержания автомобилей в исправном состоянии, проектирование, техническое перевооружение, реконструкция, производственный участок, производственный корпус, планировка участка, технический уровень, оптимизация.*

Введение. Основная задача автомобильного парка состоит в перевозке грузов и (или) пассажиров. Для бесперебойного выполнения этой задачи необходимо содержать парк автомобилей в исправном состоянии, для чего создают материально-техническую базу (здания, сооружения, технологическое и подъемно-транспортное оборудование, приспособления и инструменты). Функции этой базы, составляющие техническую эксплуатацию автомобилей как стадию их жизненного цикла, включают диагностирование, техническое обслуживание, ремонт и хранения [1; 2]. Содержание, трудоемкость и периодичность указанных воздействий (за исключением хранения) нормированы ТКП 248-2010 [3], который является историческим продолжением «Положения о техническом обслуживании и ремонте автомобилей», введенным в действие в 1932 г. Техническое обслуживание и хранение призваны продлить время пребывания автомобилей в исправном состоянии, а ремонт необходим для устранения неисправностей и восстановления ресурса.

Материально-техническая база автотранспортного предприятия создается на многие годы и требует огромных затрат. Даже небольшие просчеты и ошибки при ее проектировании сказываются в виде увеличения трудоемкости работ, неблагоприятных или опасных условий труда в течение всего времени ее использования. Ввод в эксплуатацию автомобилей новых моделей с ростом их количества требует количественного и качественного изменения частей материально-технической базы предприятия с предварительным изложением этих изменений в виде проектов.

Студенты технических вузов основательно в течение двух–трех семестров изучают основы проектирования объектов двух видов (устройств и процессов). При этом проектирование объектов третьего вида (разработка планировок участков, компоновок производственных корпусов и генерального плана предприятия) изучается по остаточному принципу в течение одного семестра. Однако в составе графического материала дипломного проекта по технической эксплуатации автомобилей, разработке технологического процесса отводится 1–2 листа, разработке средств технологического оснащения – один лист, а третья часть этого материала (3–4 листа) посвящается созданию или совершенствованию производственных участков или зон предприятия. Только две компетенции образовательного стандарта ОСВО 1-37 01 06 [4], характеризующие проектно-конструкторскую деятельность выпускника (ПК-12 – анализировать перспективы и направления развития производственно-технической базы и автомобильного транспорта в целом и ПК-14 – осуществлять авторский надзор за сооружением или реконструкцией организаций

автомобильного транспорта в пределах соответствующей компетенции), отдаленно относятся к предмету настоящего курса.

Нынешние студенты завтра станут руководителями и специалистами автотранспортных предприятий, от них будут зависеть технический прогресс и результаты работы этих предприятий. Современные требования к техническому уровню производства, а следовательно, конкурентоспособности оказываемых услуг, диктуют новые подходы к обучению и повышению качества подготовки студентов по автоэксплуатационным специальностям, в т.ч. и по проектированию автотранспортных предприятий. Эффективное изучение курса как одной из важных прикладных дисциплин играет важную роль в творческом развитии студента, а совершенствование полученных знаний необходимо для будущего служебного роста молодого специалиста.

Цель работы состоит в придании программным и учебным изданиям по проектированию автотранспортных предприятий научно-практической и методической направленности, обеспечивающей высокий технический уровень проектным материалам, разрабатываемым студентами, с использованием которых будет происходить техническое перевооружение и реконструкция производственных участков и зон предприятий.

Необходимость совершенствования курса. Глубокое усвоение материала курса – предпосылка повышения технического уровня производства путем разработки новых планировок участков и компоновки производственного корпуса с выбором лучших технических решений из действующих.

Совершенствование курса обусловлено двумя причинами. Первая – материал существующих учебных изданий в неполной мере отражает последние научные разработки, а также технические решения, применяемые в производстве. Вторая – приобретается опыт нового изложения изучаемых проблем.

Содержание курса. Курс содержит как традиционные, но обновленные части, так и новые части, адаптированные к проектированию автотранспортных предприятий различных видов.

Автотранспортные предприятия, в зависимости от принадлежности автотранспортных средств и производственных функций, подразделяются на автоэксплуатационные, автообслуживающие и авторемонтные. Автоэксплуатационные предприятия выполняют перевозку грузов и пассажиров собственным или арендованным парком подвижного состава с его межсменным хранением, техническим обслуживанием и текущим ремонтом. Автообслуживающие предприятия выполняют услуги, связанные с хранением, техническим обслуживанием, текущим ремонтом и заправкой топливом, маслами, технологическими жидкостями и сжатым воздухом любых транспортных средств, приписанных как к данному экономическому региону, так и следующих через него (транзитных), принадлежащих как предприятиям, так и отдельным гражданам. Авторемонтные предприятия в большинстве случаев специализированы по оказанию услуг и выполняют все виды ремонта автомобилей (агрегатов) с восстановлением их деталей. Проектирование предприятий каждого вида требует учета их особенностей.

Большее внимание следует уделять увеличению объема диагностических работ в техническом обслуживании и ремонте автомобилей.

Отмечено, что производственная программа и годовой объем работ автообслуживающих предприятий аналитически определить трудно, поэтому следует руководствоваться статистическими маркетинговыми сведениями, полученными в результате наблюдений за последние годы.

В качестве проявления заботы о работниках предприятия увеличен объем материала о проектировании административных и бытовых помещений.

Раскрыты связи планировки производственных участков с компоновочным решением производственного корпуса, которое, в свою очередь, связано с генеральным планом предприятия.

В ходе проектирования автотранспортных предприятий рекомендовано учитывать следующие требования:

- использование достижений науки, техники и передового опыта в области технической эксплуатации автомобилей;
- широкое применение ресурсо- и природосберегающих процессов;
- внедрение агрегатного ремонта автомобилей в автоэксплуатационных предприятиях;
- использование эффективной организации и оптимизированных технологических процессов при разработке объемно-планировочных решений;
- строгое соблюдение норм и требований охраны труда и окружающей среды;
- создание комфортных социально-бытовых условий для работающих.

Методические особенности курса. *Формулирование цели курса.* Ряд учебных программ и изданий трактуют цель курса как системное изложение соответствующего материала. С такой формулировкой трудно согласиться. Системное изложение материала – это лишь средство достижения цели, а сама цель

выражается более высоким результатом в производстве, обслуживаемом изучаемым курсом. Цель проектирования определяется стадией жизни предприятия. При строительстве нового предприятия – это создание проекта предприятия, которое по своему техническому уровню превосходит действующие предприятия отрасли. При развитии действующих производств – это разработка производственных участков с более высокими техническими и экономическими показателями за счет использования в проектах прогрессивных технологических и организационных решений. Таким образом, цель курса заключается в том, чтобы студенты, изучающие этот курс, были способны создать планировки участков и компоновки корпусов, превосходящие по указанным показателям существующие объекты. Следует подчеркнуть, что использование в полном объеме существующих и предложенных ранее решений – это копирование ранее созданных, отслуживших свое время проектов, а настоящее проектирование – это описание несуществующего, но нового прогрессивного объекта.

Системность курса выражается комплексным решением технологических, организационных и экономических задач, направленных на повышение производительности труда и качества услуг со снижением их себестоимости и непереносимым обеспечением требований безопасного труда (техники безопасности, промышленной санитарии, взрывопожарной и пожарной безопасности) и охраны окружающей среды. Технологическая часть проекта является ведущей, поэтому указанная системность обеспечивается тем, что каждое технологическое решение должно быть экономически обосновано и подкреплено современной организацией.

Выделение проектирования предприятий из системы проектирования технических объектов. Если проектирование процессов согласуется с организацией производства во времени, целью которой является сокращение длительности производственного цикла, то проектирование предприятий или их частей является элементом организации производства в пространстве. Добиваются наилучшего расположения рабочих мест с технологическим оборудованием на территории производственного участка, расположения участков в производственном корпусе и расположения зданий, сооружений, площадок и зон на территории предприятия, а самого предприятия – на территории экономического региона. Планировки производственных участков должны быть согласованы с компоновочным решением производственного здания, которое, в свою очередь, связывают с генеральным планом предприятия.

Роль реконструкции и технического перевооружения в совершенствовании предприятия. Большинство учебных изданий нацеливают студента на разработку проекта целого предприятия [5–7]. Однако в настоящее время это явление редкое, требующее больших затрат. Проектирование предприятия – предмет деятельности проектного института, в котором наш выпускник вряд ли будет работать. Средства на создание предприятия выделяли сверху один раз, а средства на совершенствование производства зарабатывают работники самого предприятия. Развитие производства тесно связано с реконструкцией и техническим перевооружением его частей, на что мы должны ориентировать студентов, тем более, что эти мероприятия с проектными работами на предприятии выполняются силами своих работников. Момент начала реконструкции или технического перевооружения определяется необходимостью повышения производственной мощности участков, оказания услуг нового вида, снижения расхода производственных ресурсов или улучшения условий труда.

Разработку генерального плана предприятия (в виде его схемы) студентами в учебных целях следует оставить, чтобы они имели представление о производственном процессе предприятия и наилучшем расположении различного назначения зданий, сооружений и зон друг относительно друга, сторон света и преимущественного направления ветров [8].

Проектирование рабочих мест. Рабочее место – элементарная ячейка производства. Рабочие места (которым уделяют недостаточное внимание при разработке планировок участков) на предприятиях учитываются, до них доводят нормы расхода производственных ресурсов, их аттестуют, составляют паспорта и планы мероприятий, реализация которых обеспечивает социальные требования и достойные условия производительного труда с высоким качеством услуг.

Оптимизация планировочного решения – это выбор лучшего решения путем перебора из множества возможных планировок, отличающихся друг от друга взаимным расположением рабочих мест: тупиковым, прямоточным или комбинированным; прямоугольным или косоугольным; поперек или вдоль пролета; одно- или двухрядным; с проходами или без проходов. Оборудование располагают группами в пролете в два, три или четыре ряда в зависимости от размеров оборудования и ширины пролета. При расположении оборудования длинной стороной поперек пролета, а рядами – вдоль пролета между их рядами оставляют проезд для транспорта. При трех рядах оборудования продольных проездов может быть два. Возле одного проезда может быть расположен двоярный ряд оборудования. Оборудование следует располагать так, чтобы рабочие находились со стороны проезда или прохода, что облегчает обслуживание рабочего места (подачу заготовок, прием деталей, удаление стружки).

Средством оптимизации служит *геометрическое моделирование* с использованием темплетов оборудования. Ограничениями при оптимизации служат нормы технологического проектирования [9] и требования охраны труда. Основным параметром оптимизации при технологическом проектировании (таблица 1) служит транспортная работа по перемещению обслуживаемых или ремонтируемых изделий. Излишняя транспортная работа приводит к перерасходу зарплаты и энергии.

Эпюры грузопотоков. Прямолинейность перемещения обслуживаемых (ремонтируемых) изделий, грузопотоков и транспортную работу на производственном участке оценивают эпюрой грузопотоков. Для этого на планировку участка наносят траекторию перемещения изделий с указанием направления. В некоторых точках, где изделие разделяется на части, эта траектория также разделяется на ряд путей. Там, где части изделия соединяются в целое, пути сливаются. Эту траекторию принимают в качестве оси координат, характеризующей длину перемещения. В начале и конце оси, а также в точках разделения и слияния путей перпендикулярно этой оси откладывают отрезки прямых, которые в масштабе соответствуют массе единичного изделия или его части. Концы отрезков соединяют прямыми или кривыми линиями, параллельными траектории перемещения, а для наглядности площадь графика штрихуют. Так получают эпюру грузопотоков на производственном участке. Сменный грузопоток равен произведению отрезка прямой при входе на участок на сменную производственную программу обслуживания (ремонта) изделий. Транспортная работа, отнесенная к одному изделию, определяется площадью эпюры. Транспортная работа коррелирована с производственной площадью участка, излишки которой увеличивают капитальные вложения, налоги и затраты на содержание зданий.

Таблица 1. – Ограничения и параметры оптимизации при разработке планировки производственного участка и компоновки производственного корпуса

Проектируемые объекты	Учитываемые показатели	
	Ограничения	Параметры оптимизации
Производственный участок (планировка)	производственная программа и годовой объем работ участка; режим работы участка; наличное технологическое и подъемно-транспортное оборудование; нормы технологического проектирования; охрана труда; взрывопожарная и пожарная безопасность; охрана окружающей среды; санитарные требования	капитальные вложения; транспортная работа по перемещению изделий по территории участка; объем строительно-монтажных работ; производственная площадь участка; трудоемкость прокладки инженерных сетей; потери энергии и напора в инженерных сетях
Производственный корпус (компоновка)	режим работы корпуса; охрана труда; пожарная безопасность; охрана окружающей среды; санитарные требования	капитальные вложения; транспортная работа по перемещению изделий по территории корпуса; общая и производственная площадь корпуса; трудоемкость прокладки инженерных сетей; потери энергии и напора в инженерных сетях

Эпюру грузопотоков используют при оптимизации транспортных перемещений и выборе и обосновании видов подъемно-транспортных средств, применяемых на участке.

Использование поточной организации производства. Любое производство стремится к высшей форме своей организации – поточному производству, которое обеспечивает наивысшую производительность труда, не требует высококвалифицированных рабочих и, следовательно, снижает себестоимость обслуживания или ремонта автомобилей. Область эффективного использования разборочных и сборочных поточных линий в ремонтном производстве с прерывным перемещением изделий обусловлена тактом производства менее 10 мин. Применение поточной организации производства при ЕО становится целесообразным при минимальной суточной программе 100 обслуживаемых автомобилей, ТО-1 – 12–15 автомобилей и ТО-2 – 5–6 автомобилей. Однако такая организация неприменима при текущем ремонте автомобилей ввиду нерегулярности работ.

Выбор композиционных центров компоновки производственного корпуса. Производственный участок, на котором выполняется большой объем работ и к которому тяготеет большинство других участков, представляет собой композиционный центр. Таким центром производственного корпуса автоэксплуатационного и комплексного автообслуживающего предприятий служит участок текущего постового

ремонта автомобилей, с которым связаны специализированные участки ремонта частей автомобиля. Трудоемкость работ, выполняемых на участке постового ремонта, равна четверти объема всех обслуживающе-ремонтных воздействий, остальная четверть выполняется на специализированных участках ремонта частей автомобилей. Специализированные участки ориентируют и располагают вокруг участка постового ремонта. В других подходящих местах производственного корпуса располагают участки диагностирования и технического обслуживания. Причем участок ЕО с большим объемом моечных работ с очистным раствором и установками для его регенерации желательнее расположить в отдельном здании.

Подход к разработке компоновки производственного корпуса агрегаторемонтного предприятия несколько иной. Композиционным центром в этом случае являются участки разборки и сборки автомобильных агрегатов, между которыми располагаются участки восстановления деталей. На участках композиционного центра выполняют до 80% объема всех ремонтных работ. Наименьшие – площадь производственного корпуса, транспортная работа по перемещению изделий и потери энергии – будут обеспечены при учете следующих положений:

- перемещения изделий при их общей разборке и общей сборке назначают параллельно и навстречу друг другу;
- разборочно-очистной участок имеет один канал входа предмета ремонта и несколько каналов выхода; сборочный участок, наоборот, имеет несколько каналов входа и один канал выхода; участки восстановления деталей – по одному каналу входа и по одному каналу выхода;
- базовая корпусная деталь или сборочная единица ремонтируемого агрегата выходит с разборочно-очистного участка последней, а поступает на сборочный участок первой;
- участки восстановления деталей располагают между каналами выхода соответствующих деталей с разборочно-очистного участка и входа участка сборки, а перемещения деталей назначают перпендикулярно перемещению собираемых и разбираемых агрегатов;
- длины участков восстановления деталей должны быть равными расстоянию между сортировочно-накопительными и комплектовочно-сборочными рабочими местами или нечетно кратны этим расстояниям. Последнее требование относится к участкам восстановления деталей с большим числом рабочих мест (например, блоков цилиндров и коленчатых валов);
- обслуживающие участки располагают на минимальном расстоянии от обслуживаемых участков (склад ремонтного фонда – разборка; растворный пункт – очистка; приготовление СОЖ, затачивание инструмента – механическая обработка заготовок; фильтрация масла, подогрев воды – обкатка; приготовление лакокрасочных материалов – окрашивание и др.).

Перечисленным принципам удовлетворяют компоновка корпуса, в котором пролеты с участками разборки и сборки агрегатов расположены параллельно друг другу, но перпендикулярно остальным пролетам здания. Склады ремонтного фонда и товарной продукции примыкают, соответственно, к разборочно-очистному и обкаточно-испытательному участкам. При этом исключается пересечение потоков движущихся предметов ремонта.

Производственные участки необходимо группировать по степени опасности, производственным связям и нежелательности соседства. Если на участках имеет место избыточное тепловыделение или излучение, выделение или применение вредных или взрыво- и пожароопасных веществ, то такие участки выделяют стенами или перегородками с возможностью выхода рабочих на улицу. Выделяют участки: кузнечный, сварочный, термический, гальванический, медницкий, переработки полимеров и резины, ремонта аккумуляторных батарей, обкатки и испытания двигателей, приготовления краски, окрашивания, деревообрабатывающий, зарядки электрокаров и электропогрузчиков, склады сгораемых материалов и несгораемых материалов в сгораемой упаковке, склады баллонов. В одном помещении можно размещать участки кузнечный, термический, сварочный и медницкий. Участки категорий А и Б по взрывопожарной и пожарной опасности следует располагать с наветренной стороны здания на наибольшем расстоянии от пожароопасных участков.

Техническая эстетика предприятий, которой не уделяется достойное внимание на стадии проектирования предприятий, проявляется в чистоте помещения, освещении рабочих мест, цвете поверхностей оборудования и элементов здания, состоянии заводской территории. Если в помещениях соблюдены оптимальные нормы освещенности за счет своевременной очистки остекления и осветительных приборов, то производительность труда повышается на 12–15%, качество работ – на 15–20%, а экономия электрической энергии составляет 1200–2000 кВт·ч в год на участке площадью 500 м². Содержание помещения и оборудования в надлежащем санитарно-гигиеническом состоянии требует использования комплекта оборудования для пылеуборки, подметания, мойки и шлифования полов. Психологический комфорт человека в производственной среде обеспечивают применением оптимальных цветов окраши-

вания оборудования и элементов зданий, рациональным соотношением их яркости, а также созданием цветовой иллюзии для устранения неблагоприятных воздействий. Доля площади предприятия с зелеными насаждениями нормируется. При озеленении территории учитывают биологические характеристики насаждений.

Оценка технического уровня проекта и качества создаваемого или совершенствуемого производственного участка (в соответствии с ГОСТ 2.116-71) позволяет принять решение о его вводе в эксплуатацию с последующей аттестацией. Карта технического уровня в общем виде включает следующие сведения: общие данные; определение уровня качества участка; планирование изменения показателей качества изделия; источники информации; выводы и предложения.

Технический уровень и качество проекта участка определяют отношением показателей качества создаваемого производственного участка к соответствующим показателям качества участка-аналога (таблица 2). Номенклатура показателей, в общем случае, включает следующие показатели: назначение; надежность обслуживаемых или ремонтируемых изделий; безопасность; технологичность; эргономические; эстетические; экологические; стандартизация и унификация; патентно-правовые; экономические. Наиболее критичными показателями качества обслуженных или отремонтированных автомобилей или их частей на производственном участке являются показатели назначения, надежности и экономические.

Таблица 2. – Определение технического уровня и качества производственного участка

Показатель качества участка		Базовый показатель качества			Относительный показатель качества	
наименование	величина	по стандарту	перспективного участка	аналога	к перспективному участку	к аналогу
1	2	3	4	5	6	7

В качестве показателей аналогов принимают характеристики гипотетических или лучших производственных участков отрасли. Качество изделий оценивают единичными, комплексными и интегральными показателями. Оценка студентом технического уровня и качества своего проекта настраивает его на достижение высокого результата и стимулирует повышение его ответственности за качество проектных работ.

Заключение. Совершенствование курса «Проектирование предприятий автомобильного транспорта» требует уточнения содержания, структуры и методических особенностей курса, объема проектных работ. Сформулирована уточненная цель курса – обеспечить будущего специалиста автомобильного транспорта знаниями и умениями, достаточными для разработки планировки производственного участка и компоновки производственного корпуса высокого технического уровня. Реконструкция и техническое перевооружение частей предприятия (производственных участков и зон) играют в настоящее время основную роль в текущем совершенствовании всего предприятия.

Предложена процедура оптимизации планировки производственного участка на основе геометрического моделирования с предоставлением эпюры грузопотоков. Уточнены условия внедрения поточной организации труда на различных производственных участках. Впервые представлен выбор композиционных центров при разработке компоновки производственного корпуса. Приведены мероприятия по технической эстетике предприятия для использования на стадии проектирования. Рекомендована оценка технического уровня проектных решений с помощью карты технического уровня.

Учебное издание, подготовленное с использованием указанных элементов, повысит качество подготовки специалистов автомобильного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савич, Е.Л. Техническая эксплуатация автомобилей : учеб. пособие. В 3 ч. / Е.Л. Савич. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2015. – Ч. 1 : Теоретические основы технической эксплуатации. – 425 с. ; Ч. 2 : Методы и средства диагностики и тех. обслуживания автомобилей. – 362 с. ; Ч. 3 : Ремонт, организация, планирование, управление. – 632 с.
2. Иванов, В.П. Техническая эксплуатация автомобилей. Дипломное проектирование : учеб. пособие / В.П. Иванов. – Минск : Выш. шк., 2015. – 215 с.
3. Технический кодекс установившейся практики. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения. Нормы і правты правядзення = Тэхнічнае абслугованне і рамоннтаўтамабільных транспартных сродкаў : ТКП 248-2010 (02190). – Введ. 13.05.2010. – Минск : М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 2012. – 42 с.
4. Образовательный стандарт высшего образования. Высшее образование. Первая ступень. Специальность 1-37 01 06 Техническая эксплуатация автомобилей (по направлениям). – Минск : М-во образования Респ. Беларусь, 2013. – 68 с.

5. Проектирование авторемонтных предприятий / Л.В. Дехтеринский [и др.]. – М. : Транспорт, 1981. – 218 с.
6. Проектирование предприятий автомобильного транспорта : учебник для вузов / М.М. Болбас [и др.] ; под ред. М.М. Болбаса. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2004. – 527 с.
7. Савич, А.С. Проектирование авторемонтных предприятий. Курсовое и дипломное проектирование : учеб. пособие / А.С. Савич, А.В. Казацкий, В.К. Ярошевич ; под ред. В.К. Ярошевича. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 256 с.
8. Болбас, М.М. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: генеральный план автотранспортного предприятия : учеб.-метод. пособие / М.М. Болбас, Е.Л. Савич. – Минск : БНТУ, 2012. – 27 с.
9. Отраслевые нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта : ОНТП 01-91. – Введ. 01.01.1992 / Росавтотранс. – М. : Гипроавтотранс, 1991. – 184 с.

Поступила 23.06.2020

**IMPROVING THE QUALITY OF TRAINING SPECIALISTS
IN TECHNICAL OPERATION OF CARS WITH IMPROVEMENT
OF THE COURSE "DESIGN OF ENTERPRISES OF VEHICLE TRANSPORT"**

V. IVANOV

The content, structure and methodological features of the course on designing automobile transport enterprises are determined, the purpose of which is to provide the future specialist with the knowledge and skills sufficient to develop the layout of the production site and the layout of the production building of a high technical level.

Improving the course material involves clarifying the place of design of enterprises and its parts in the system of designing production facilities of various kinds. Taking into account the experience of presenting the course, the directions of improving its material are determined, subordinate to the specified goal. The methodological features of the course are described, highlighting the role and significance of reconstruction and technical re-equipment of parts of the enterprise, optimization of technical solutions based on geometric modeling with the construction of a diagram of cargo flows. The conditions for the introduction of flow organization of various production sites are determined. For the first time, the choice of compositional centers is presented when developing the layout of a production building. Given at the design stage of the event on the technical aesthetics of the enterprise. An assessment of the technical level of design solutions using a technical level map is recommended.

Keywords: motor transport enterprise, vehicle maintenance system, design, technical re-equipment, reconstruction, production site, production building, site layout, technical level, optimization.

УДК 656

РАЗВИТИЕ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ ПОЛОЦКЕ И НОВОПОЛОЦКЕ

*д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ¹, А.К. ГОЛОВНИЧ¹,
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА², В.Н. КУЗЬМЕНКО¹,
А.С. КРАСИЛЬНИКОВА¹, Е.Н. ГОРЕЛИК¹, С.С. СЕМЧЕНКОВ¹, Е.Н. КОТ¹*
*¹(Белорусский национальный технический университет, Минск)
²(Полоцкий государственный университет)*

Приведен анализ серьезных недостатков в организации дорожного движения, которые приводят к большим общенациональным потерям, имеющим тенденцию к увеличению, что требует принятия решительных мер. Изложены технологические и организационные решения, базирующиеся на апробированных международных подходах, хорошо зарекомендовавших себя во многих странах мира, и, безусловно, приемлемых для городов нашей страны при обеспечении необходимых условий их использования, а также на опыте отдельных внедренных мероприятий на отечественной улично-дорожной сети. Даны предварительные практические направления решения части проблем – за счет развития системы городского пассажирского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке. Эти мероприятия позволят кардинально повысить качество дорожного движения без больших капиталовложений; могут быть применены и в других городах Республики Беларусь.

Ключевые слова: городской транспорт, безопасность, пассажиропоток, полоса движения, кольцевое движение, регулирование.

Введение. В Республике Беларусь за последние 20 лет количество автомобилей увеличилось в 4 раза и превысило 3,5 млн единиц. Это вызвало ряд проблем, связанных с увеличением нагрузки на улично-дорожную сеть, особенно в городах. Снизилась скорость сообщения, ухудшились режимы движения, появились перегрузки, возросло количество аварий. Ежегодно в нашей стране происходят более 100 тыс. аварий. В связи с этим в значительной степени актуализировались вопросы развития общественного (городского пассажирского) транспорта, повышения его привлекательности за счет мероприятий по организации дорожного движения, что позволит решить ряд городских проблем и вытеснить личный транспорт с центральных улиц городов [1–3].

В других странах применяют следующие типы выделения полос для городского пассажирского транспорта (ГПТ):

- полоса у бордюрного камня, физически не отделена от главной дороги, может быть с цветной поверхностью или без нее (рисунок 1, а);
- полоса, которая полностью или частично отделена от главной дороги (рисунок 1, б). Полоса зарезервирована для автобусов. Может быть у бордюрного камня или посередине дороги, или полностью отдельной дорогой;
- автобусная полоса на расстоянии одной полосы от бордюра, чтобы сохранить парковочные места для автомобилей (рисунок 1, в);
- автобусная полоса, расположенная по середине дороги (рисунок 1, г);
- полоса для автобусов, на которой разрешается движение автомобилей с числом пассажиров два и более – HOV lane (рисунок 1, д);
- автобусные полосы с применением выносных посадочных площадок. Автобус останавливается в полосе без дополнительного маневрирования (рисунок 1, е);
- дополнительная автобусная полоса на подходе к участку со светофорным регулированием для обеспечения приоритетного движения автобусов через перекресток (рисунок 1, ж).

Комплексная сеть автобусных полос может повысить эффективность работы транспортной системы, увеличить количество перевезенных пассажиров, сократить автомобильные поездки и стимулировать более компактное мультимодальное развитие, где жители владеют меньшим количеством транспортных средств, меньше ездят на автомобилях и больше полагаются на ходьбу, езду на велосипеде и ГПТ.

В отчете 155 NCHRP «Использование автомобильных дорог: руководство по планированию и проектированию» [4] предложены критерии применения автобусных полос, приведенные в таблице 1.

Интегрированная сеть автобусных полос, поддерживаемая другими транспортными стратегиями, может привести к тому, что скорость передвижения при использовании ГПТ будет конкурентоспособной с автомобильными поездками. Но для этого нужны значительные вложения в инфраструктуру ГПТ, позволяющие повысить его комфорт и привлекательность, а также скорость передвижения.



а



б



в



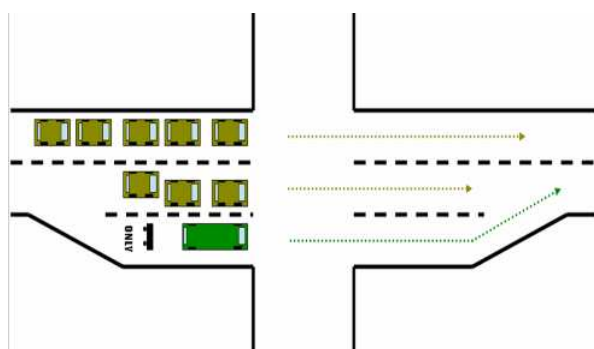
г



д



е



ж

Рисунок 1. – Типы выделенных полос для городского пассажирского транспорта

Таблица 1. – Критерии применения автобусных полос

Вид	Минимальная пиковая интенсивность движения в час		Факторы
	автобусы	пассажиры	
Автобусные улицы или торговые центры	80–100	3,2–4,0	Коммерчески ориентированное направление
Полосы у бордюрного камня, нормальный поток	50–80	2,0–3,2	Коммерчески ориентированное направление
Полосы у бордюрного камня, нормальный поток	30–40	1,2–1,6	По меньшей мере две полосы для другого трафика в одном направлении
Полосы посередине проезжей части	60–90	2,4–3,6	По меньшей мере две полосы для другого трафика в одном направлении; возможность разделения конфликтов поворотных автомобилей и автобусов
Автобусные полосы навстречу движению, короткие участки	20–30	0,8–1,2	Позволяет автобусам продолжать движение по нормальному маршруту, подойти с другой стороны или обойти скопленный транспорт перед мостом
Автобусные полосы навстречу движению, длинные участки	40–60	1,6–2,4	По меньшей мере две полосы доступны для другого трафика во встречном направлении. Расстояние более 150 м

На рисунке 2 отображены относительные скорости движения (Relative travel speeds) в зависимости от типа полос для пассажирского транспорта.

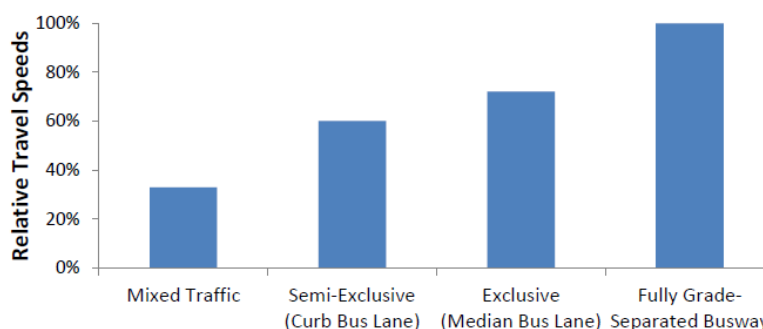


Рисунок 2. – Относительное увеличение скорости движения автобусов в зависимости от типа автобусных полос

В типичных перегруженных городских условиях обособленные полосы, расположенные у края проезжей части и сохраняющие конфликт с правоповоротным транспортом (Curb bus lane), и обособленные полосы без конфликтного движения, расположенные посередине проезжей части (Median bus lane), могут повысить скорость движения автобуса примерно в два раза по сравнению с полосами, на которых осуществляется смешанное движение (Mixed traffic) автобусов и автомобилей [5]. Полосы с более высоким уровнем обособления, на которых исключены остановки на перекрестках (Fully Grade-Separated Busway), – примерно в три раза по сравнению с полосами Mixed traffic.

Следует отметить, что сама по себе выделенная полоса для автобусов может сокращать лишь небольшую часть общего времени поездки (обычно от 2 до 10 мин в течение 30–60 мин, что меньше, чем дополнительный доступ к остановочному пункту и время ожидания, необходимое для поездок в городском пассажирском транспорте). На продолжительность поездки также влияют: доступность остановочных пунктов автобусов; время ожидания автобуса; время, затрачиваемое на посадку–высадку пассажиров; задержка автобуса на перекрестках.

Увеличение скорости и регулярность перевозок увеличивает пассажиропоток. Экономия времени на 10% обычно увеличивает пассажиропоток на 4–6%. Большие выгоды возможны, если реализация выделенных полос для автобусов сочетается с другими транспортными стратегиями (таблица 2).

Автобусные полосы непосредственно приносят пользу пассажирам автобусов, увеличивая скорость их передвижения. Они повышают пассажиропоток (пассажиро-километров за автобусо-час), что увеличивает доходы от проезда. Если новые автобусные поездки вытесняют автомобильные поездки, они уменьшают внешние издержки, включая дорожно-транспортные и автомобильные перегрузки, риск аварии и выбросы загрязняющих веществ.

Таблица 2. – Примеры транспортных стратегий

Улучшение обслуживания	Стимулирование	Изменение использования территорий
Повышенное обслуживание, которое увеличивает частоту и уменьшает скученность; более привлекательные транспортные средства; более привлекательные станции; лучшее информирование пользователей; более удобные платежные системы	Эффективное ценообразование на дороге и парковке; программы по уменьшению расстояний поездок; уменьшение тарифов; транспортный маркетинг и реклама	Более компактное и смешанное развитие вокруг частых транспортных маршрутов; улучшение условий ходьбы и езды на велосипеде; более доступное жилье вдоль частых транспортных маршрутов

Автобусные полосы влекут затраты на строительство и расходы на контроль за соблюдением установленных правил, усложняют транспортные операции, уменьшают общую пропускную способность и иногда вытесняют парковку на улице. Некоторые автобусные полосы, особенно высокопроизводительные системы BRT (Bus Rapid Transit), требуют дополнительного пространства для станций и более широких тротуаров для улучшения доступа пешеходов.

Автобусные полосы могут обеспечить существенные преимущества безопасности. Несмотря на потенциально опасные взаимодействия поворотного транспорта и автобусов, автобусные полосы обеспечивают статистически устойчивое сокращение столкновений в целом [5; 6]. В результате исследований, проведенных в Мельбурне, выявлено, что приоритетный режим городского автобуса сократил общее количество несчастных случаев на 14%, а смертельные или серьезные несчастные случаи – на 31% (от 42 до 29 ежегодных инцидентов). Меры приоритета трамвайного движения уменьшают аварийность на 13,9%, а приоритет полосы – на 19,4%, включая сокращение общего числа и серьезных аварий, а также аварийные ситуации с транспортными средствами, пешеходами и мотоциклами.

В проекте, изложенном в источнике [7], были исследованы отдельные элементы системы BRT. В таблице 3 приведены краткие выводы проводимых исследований.

Таблица 3. – Краткие выводы по результату исследований пассажирского транспорта [7]

Параметр	Эффект	Примечание
Плотность станций (станции на милю)	1,42–2,23-минутное увеличение времени маршрута на каждую станцию, добавленную за милю	На основе наблюдений и сопоставления с литературой
Использование низкопольных автобусов	8,16–9,85-минутное сокращение времени маршрута, когда автобусный парк состоит из всех низкопольных автобусов	На значение влияет уровень посадочной площадки и система сбора оплаты за проезд
Выделенные автобусные полосы	6,05–7,02-минутное увеличение времени маршрута, когда не используются выделенные полосы автобусов по сравнению с высоким уровнем выделенных полос движения	Низкий уровень выделенных автобусных полос показывает аналогичный, но меньший эффект
Плотность светофорных объектов с приоритетным движением автобусов (отношение перекрестков с приоритетным движением (TSP) к общему количеству светофорных объектов)	Эффект варьировался между наборами данных и уровнями плотности TSP, демонстрируя как увеличение, так и уменьшение времени маршрута	Эффективность TSP сильно зависит от множества местных факторов
Количество посадочных дверей	0,69–11,83-минутное увеличение времени маршрута, когда используется только одна посадочная дверь по сравнению с двумя посадочными дверями	На значение влияет система сбора оплаты за проезд

Относительно недорогие улучшения в обслуживании автобусов, такие как увеличение расстояния между станциями, многодверный посадочный салон на станции с внешним сбором платы за проезд и низкопольные автобусы, могут иметь значительные преимущества в плане сокращения времени в пути [7]. Более того, эти преимущества сопоставимы с преимуществами более глубоких усовершенствований инфраструктуры, таких как выделенные полосы. Также акцентируется внимание на то, что преимущества некоторых элементов системы BRT могут быть применимы во многих городских районах, но значительно различаться в зависимости от местных условий.

Выгоды от времени поездки увеличиваются в зависимости от класса автобусной полосы. Как показано в таблице 4, обособленные автобусные полосы более высокого класса могут сэкономить 4,5 мин на милю по сравнению с базовой полосой, тогда как полоса более низкого класса – 1,1 мин на милю.

Таблица 4. – Сравнительный анализ времени поездки в зависимости от вида автобусной полосы [5]

Параметр полосы		Экономия по сравнению с базовой полосой * (мин на милю)
Вне улицы	Приподнятая	4,5
	Частичное уровневое разделение	4,3
	На одном уровне	3,6
На улице	Полоса, расположенная по середине проезжей части	1,5
	Автобусная полоса	1,1

* Базовая полоса – скорость движения 10 миль/ч с шестью станциями на милю

Эксплуатационные преимущества выделенных автобусных полос включают в себя сокращение времени в пути, лучшее соблюдение графика и снижение варибельности времени в пути. Степень этих преимуществ сильно варьируется в зависимости от широкого круга факторов: класса автобусной полосы, количества пересекаемых светофорных объектов, местных условий движения и др.

В качестве общих рекомендаций по выбору стратегий управления городскими дорогами можно выделить следующие:

1. Если автомобильный спрос и заторы низкие, поездки на автобусе нужно поощрять операционными улучшениями, стратегиями приоритетов на пересечениях и Правилами дорожного движения, которые требуют, чтобы автомобилисты уступили автобусам, входящим в поток движения.

2. Если автомобильный спрос и заторы умеренные, на дорогах должны быть полосы HOV, в которых размещаются автобусы и загруженные транспортные средства. По мере увеличения перегруженности минимальное количество пассажиров дорожных транспортных средств должно увеличиваться.

3. Если автомобильный спрос и заторы высокие, городские дороги должны иметь отдельные автобусные пути. Более высокую интенсивность автобусов оправдывают функции Bus Rapid Transit, включая центральные (медианные) полосы, привлекательные станции с быстрой загрузкой и улучшенный пешеходный и велосипедный доступ. Очень высокая интенсивность автобусов может оправдывать многочисленные полосы для автобусов-экспрессов, а также специальные скоростные пандусы и перекрестки [5].

Внедрение алгоритмов приоритетного проезда в светофорное регулирование. Технологию TSP (transit signal priority – приоритет движения на участках со светофорным регулированием) можно разделить на две категории [8; 9]:

– пассивный TSP (нет никакого взаимодействия между автобусом и светофорными объектами). Сигналы светофоров оптимизированы или скоординированы, чтобы обеспечить последовательный зеленый сигнал для движения по дороге/коридору (например, «зеленая волна»). Движение улучшено для всех транспортных средств;

– активный TSP (технология обнаружения автобуса позволяет включать нужную фазу, когда автобус приближается к перекрестку). Активный TSP требует специализированного оборудования на полосе. Активные системы TSP позволяют автобусам получать зеленый свет раньше, чем при движении без приоритета.

Многие операторы считают TSP позитивным – с рядом выгод – элементом своей сети автобусов. Отмечено, что TSP предоставляет преимущества в диапазоне 10%-го увеличения коммерческой скорости и регулярность. В Сиэтле TSP сократили время поездки до 5 мин, а также общую задержку перехода до 1,5 мин для коридора с приоритетными мерами для автобусов. В Барселоне реализация «зеленой волны» улучшила пунктуальность автобусов до 10%. «Лондонский автобус» отметил, что в среднем каждый автобус, проходящий через перекресток, оборудованный TSP, экономит не менее 2 с, тем самым обеспечивая значительную экономию времени по всему маршруту [8]. Недостатками технологии TSP являются: более низкие скорости для общего трафика (Стамбул, Лондон, Сингапур, Ванкувер); воздействие на не-приоритетные входы перекрестка и, возможно, соседние перекрестки (Лиссабон).

TSP может значительно сократить время поездки, но это преимущество может широко варьироваться в зависимости от местных условий, таких как уровни трафика в коридоре и на перекрестках улиц, тип системы TSP, а также от данных и методологии, используемых для оценки операций TSP [7].

Проводимые исследования показывают, что TSP лучше всего работает, когда ОП автобусов расположены за перекрестком и когда нет значительного пересекающего трафика, который может помешать работе TSP [7].

Организация кольцевых развязок в одном уровне. Кольцевые развязки в одном уровне получили широкое распространение в практике дорожного движения. Такие транспортные узлы более безопасны, чем традиционные нерегулируемые и регулируемые перекрестки.

Исследования, проведенные Институтом страхования безопасности дорожного движения (IIHS) и Федеральной администрацией автомобильных дорог г. Вашингтона, показали, что на кольцевых развязках обычно наблюдаются [10]: сокращение общих столкновений (на 37%); сокращение аварий с пострадавшими (на 75%); сокращение смертельных столкновений (на 90%); снижение столкновений с пешеходами (на 40%).

Основной причиной, по которой кольцевые развязки в одном уровне помогают снизить вероятность и тяжесть столкновений, является более низкая скорость движения при проезде узла. Водители замедляются при подходе к кольцевому узлу, т.к. скорости на кольцевой развязке из-за ее геометрических параметров обычно составляют от 25 до 35 км/ч. Кольцевые развязки исключают возможность боковых и лобовых столкновений.

При организации кольцевых развязок с небольшим радиусом центрального островка необходимо устраивать краевую полосу на центральном островке (полоса шириной до 2,0 м, расположенная с внешней стороны центрального островка и предназначенная для заезда задними колесами крупногабаритных транспортных средств, в т.ч. автобусов) (рисунок 3).



Рисунок 3. – Кольцевая развязка с краевой полосой на центральном островке

Кольцевые развязки в одном уровне безопасны и эффективны, но они не являются идеальным решением для всех условий. Поэтому целесообразность их применения необходимо рассматривать отдельно для каждого конкретного случая. Кольцевые развязки наиболее эффективны для транспортных узлов с высокой долей левоповоротных транспортных потоков.

В источнике [11] отмечаются следующие преимущества кольцевых узлов в одном уровне:

- низкая относительная скорость движения, что уменьшает тяжесть последствий аварий и позволяет эффективно взаимодействовать между собой транспортным средствам разных потоков;
- хорошие условия для левого поворота, который можно выполнять одновременно с нескольких полос;
- высокая пропускная способность;
- относительно невысокие удельные задержки транспортных средств;
- отсутствие необходимости в светофорном регулировании при умеренных и высоких нагрузках;
- хорошие условия для разворота крупногабаритных транспортных средств (в т.ч. маршрутных автобусов), что позволяет организовывать в таких местах конечные пункты автобусных маршрутов, а также временные развороты при закрытии отдельных участков дорожной сети.

К недостаткам кольцевых развязок можно отнести [11]:

- затрудненное пешеходное движение, что объясняется отсутствием регулирования и непрерывным транспортным потоком как на въездах в развязку, так и на выездах из нее;
- потребность в большой и ровной площади, которая в условиях города имеет значительную стоимость;
- ограниченная скорость движения прямых главных потоков (до 40 км/ч);
- некоторый перепробег прямых главных и левоповоротных потоков;
- невысокая эффективность в условиях светофорного регулирования (особенно координированного).

Таблица 5. – Возможные мероприятия в г. Полоцке, обеспечивающие снижение задержек маршрутных автобусов

Группа мероприятий	Место применения	Ожидаемый эффект	Примечание
<p>Организация выделенных полос для движения автобусов и маршрутных такси, участков проезжей части с приоритетным движением автобусов и маршрутных такси</p>	<p>2. Формирование автобусного коридора на ул. Коммунистической от ул. Е. Полоцкой до ул. Гоголя</p>	<p>3. 1. Повышение скорости движения МТС 2. Упорядочивание движения на улице 3. Повышение безопасности движения пешеходов</p>	<p>4. Движение на западном участке улицы разрешить только маршрутным автобусам и маршрутным такси. На освобожденном от автомобилей участке ул. Коммунистической может быть проложена велодорожка (велополоса). При реализации автобусного коридора необходимо пересмотреть режим работы всех СФО на ул. Коммунистической</p>
<p>Внедрение алгоритмов приоритизации в светофорное регулирование</p>	<p>2. На светофорных объектах на улице Коммунистической, если ограничить движение автомобилей на этой улице</p>		
<p>Организация кольцевых развязок в одном уровне</p>	<p>1. Реконструкция перекрестка ул. Богдановича – ул. Зыгина в кольцевую развязку в одном уровне. 2. Устройство кольцевой развязки в одном уровне на перекрестке улиц Космонавтов и Шмидта (в т.ч. для организации места разворота предлагаемого автобусного маршрута № 44)</p>	<p>3. Снижение задержек и числа остановок левоповоротных транспортных средств</p>	<p>В левоповоротном транспортном потоке с ул. Зыгина на ул. Богдановича следуют автобусы маршрутов № 2, 2э, 24, 26, 27, 28э, для которых будут существенно снижены задержки и количество остановок</p>
<p>Организация (или улучшение) локального светофорного регулирования</p>	<p>1. Ул. Октябрьская – ул. Гоголя (третья фаза для левого поворота на ул. Гоголя). Установка левой дополнительной секции светофора по направлению автобусных маршрутов. 2. Ул. Коммунистическая – ул. Гоголя (разрешение поворота направо с ул. Гоголя в течение большего периода времени в светофорном цикле). Установка правой дополнительной секции на северном подходе ул. Гоголя. 3. Ул. Юбилейная – просп. Скорины – ул. Успенская (организация светофорного регулирования). 4. Ул. Гоголя – ул. Скорины (организация светофорного регулирования). 5. Ул. Бровки – ул. 23 Гвардейцев (изменение схемы пофазного движения, корректировка диаграммы СФР)</p>	<p>4. Уменьшение задержек и числа остановок, повышение безопасности движения маршрутных автобусов и маршрутных такси</p>	<p>Проект светофорного объекта на перекрестке ул. Юбилейная – просп. Скорины – ул. Успенская разработан и должен быть реализован совместно с ремонтом моста через р. Зап. Двина по ул. Юбилейной.</p>

Окончание таблицы 5

1	2	3	4
<p>Организация координированного светофорного регулирования</p>	<p>6. Применение СФР на нерегулируемых пешеходных переходах (НПП) через ул. П. Бровки на участке от ул. Дзержинского до ул. 23 Гвардейцев (6 ед.). 7. Введение СФР на перекрестке ул. Бровки – ул. Мариненко</p> <p>1. Ул. Зыгина – ул. Октябрьская (участок от ул. Хруцкого до ул. Е. Полоцкой) 2. Ул. Богдановича (участок от ул. Зыгина до просп. Золдчего Иоанна) 3. Ул. Юбилейная (участок от пр-га Скорины до ул. Октябрьской) 4. Ул. Октябрьская (участок от ул. Гоголя до ул. Юбилейной) 5. Ул. П. Бровки (участок от ул. Дзержинского до ул. 23 Гвардейцев) 6. Ул. Гоголя (участок от ул. Октябрьской до ул. Коммунистической)</p>	<p>Уменьшение длительности задержек и количества остановок транспортного потока, в т.ч. маршрутных автобусов и маршрутных такси</p>	

† Таблица 6. – Возможные мероприятия в г. Новополоцке, обеспечивающие снижение задержек маршрутных автобусов

Группа мероприятий	Место применения	Ожидаемый эффект	Примечание
<p>1. Организация выделенных полос для движения автобусов и маршрутных такси, участков проезжей части с приоритетным движением автобусов и маршрутных такси.</p> <p>2. Поэтапное формирование автобусного коридора на магистрали, включающей улицу д. Экимань – ул. Молодежную – ул. Ктаторова – ул. Промышленную</p>	<p>1. Улицы д. Экимань – восточный участок ул. Молодежной (от ул. Калинина до ул. Генова)</p> <p>2. Западный участок ул. Молодежной (от ул. Калинина до ул. Ктаторова)</p> <p>3. Организация выделенной автобусной полосы на северном участке ул. Промышленной (в часы «пик» в направлении от ОАО «Нафтан» к селитебной территории города)</p> <p>4. Устройство выносных посадочных площадок на ОП автобусов на восточном участке ул. Молодежной (от ул. Калинина до ул. Генова)</p>	<p>1. Преимущество МТС с повышением скорости сообщения и привлечением новых пассажиров.</p> <p>2. Снижение интенсивности движения и уменьшение выбросов в жилой зоне д. Экимань и на восточном участке ул. Молодежной</p> <p>1. Премущество МТС с повышением скорости сообщения и привлечением новых пассажиров.</p> <p>2. Снижение интенсивности движения и уменьшение выбросов в жилой зоне, прилегающей к пл. Строителей</p> <p>1. Преимущество МТС с повышением скорости сообщения и, устранением простоев в заторах. Привлечение новых пассажиров.</p> <p>2. Снижение интенсивности движения автобусов по ул. Промышленной в часы «пик»</p> <p>Повышение скорости сообщения МТС за счет сокращения времени подъезда и отъезда от ОП</p> <p>Снижение задержек и числа остановок маршрутных автобусов и маршрутных такси</p>	<p>4</p> <p>Ограничение движения транзитных транспортных средств по улице д. Экимань с переводом их движения на юго-западную объездную дорогу.</p> <p>Предварительное место размещения контрольного поста – мост через безымянный ручей между Полоцкой городской больницей (Ксты) и д. Экимань</p> <p>Закрытие пл. Строителей для транзитного движения автомобилей, сохранение движения маршрутных автобусов и маршрутных такси</p> <p>Закрытие северного участка ул. Промышленной для автомобилей предлагается только в часы «пик». В межпиковые периоды сохраняется существующий режим движения на ул. Промышленной</p> <p>Альтернативный вариант выделенной полосы для автобусов на улицах, где осуществляется массовая парковка автомобилей вдоль проезжей части</p> <p>При приближении автобуса к регулируемому переходу с вызовом разрешающего сигнала пешеходом включение разрешающего сигнала для них выполняется с задержкой для пропуска автобуса</p> <p>1. На пересечении Калинина – Коласа кольцевая развязка может быть устроена до реконструкции моста на ул. Калинина и устройства развязки в разных уровнях.</p> <p>2. Вместо двух рядов расположенных регуляторов Ктаторова – Блохина и Ктаторова-Слободская может быть устроена кольцевая развязка с 5 (6) входами</p>
<p>Внедрение алгоритмов приоритизации в светофорное регулирование</p> <p>Организация кольцевых пересечений</p>	<p>Регулируемые пешеходные переходы на ул. Молодежной (вне перекрестков)</p> <p>1. Ул. Калинина – ул. Я. Коласа 2. Ул. Ктаторова – ул. Слободская и ул. Ктаторова – ул. Блохина</p>	<p>Снижение задержек и числа остановок маршрутных автобусов и маршрутных такси</p> <p>1. Снижение задержек и числа остановок транспортных средств 2. Повышение безопасности дорожного движения</p>	

Окончание таблицы 6

1	2	3	4
<p>Организация (улучшение) локального светофорного регулирования (СФР)</p>	<p>1. Светофорные объекты на ул. Молодежной 2. Применение СФР на регулируемых пешеходных переходах (НПП) через ул. Молодежную: в первую очередь на участках с 6 полосами для движения в обоих направлениях (4 НПП на участке от ул. Генова до ул. Калинина); во вторую – на участках с 4 полосами для движения в обоих направлениях (3 НПП на участке от ул. Генова до ул. Калинина, 2 НПП – на участке от ул. Калинина до ул. Клягорова) 3. Применение СФР на НПП через основную проезжую часть ул. Блохина (скоростная дорога), на которой расположены 7 пешеходных переходов, в т.ч. 5 оборудованы ИН</p>	<p>Уменьшение задержек и числа остановок, снижение выбросов от транспортных средств</p>	<p>Светофорное регулирование необходимо вводить на всех нерегулируемых пешеходных переходах. В приоритетном порядке вводить светофорное регулирование следует на нерегулируемых пешеходных переходах, оборудованных искусственными неровностями (ИН) и расположенных вблизи ОП автобусов, в связи с высокой интенсивностью пешеходов и проезжающих МТС</p> <p>Большое количество ИН на коротком участке ул. Блохина уменьшает привлекательность данной дороги и противоречит одной из основных функций ул. Блохина – возможности движения транспортных потоков в объезд центральной части города</p>
<p>Организация координированного светофорного регулирования</p>	<p>1. Организация координированного СФР на участке ул. Молодежной от ул. Клягорова до ул. Калинина. 2. Организация координированного СФР на участке ул. Молодежной от ул. Калинина до ул. Генова</p>	<p>Уменьшение задержек и числа остановок транспортного потока, в т.ч. МТС</p>	

Адаптация режимов светофорного регулирования по времени суток является одним из методов пассивной технологии TSP. Метод предназначен для минимизации общей задержки всех транспортных средств на перекрестке.

Снижение удельной задержки автомобиля позволяет уменьшить время движения в пути, снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Например, снижение удельной задержки легкового автомобиля с бензиновым и дизельным двигателем на 1 с позволяет уменьшить выбросы CO соответственно на 0,047 и 0,02 г, грузового автомобиля с полной массой до 3,5 т с бензиновым и дизельным двигателем – соответственно на 0,075 г и 0,025 г, грузового автомобиля с полной массой свыше 3,5 т с дизельным двигателем – на 0,048 г, городского автобуса – на 0,077 г [12].

Адаптация режимов светофорного регулирования по времени суток может быть выполнена через жесткое программное либо адаптивное регулирование.

Жесткое программное регулирование основано на предварительном расчете длительности цикла и фаз регулирования. Существуют четыре подхода к расчету этих параметров [13]:

- расчет по эвристическим формулам;
- расчет, основанный на минимизации суммарной задержки транспортных средств при проезде регулируемого перекрестка;
- расчет, основанный на выравнивании загрузки всех транспортных регулируемых направлений на перекрестке;
- расчет, основанный на минимизации суммарных потерь на перекрестке.

В качестве исходных данных для расчета используется информация об интенсивности и составе транспортного потока по направлениям проезда через перекресток в течение суток, о количестве полос движения на подходах к перекрестку и их специализации, также данные о схеме пофазного движения и структуре промежуточных тактов. Кроме того, при расчете должны учитываться технологические ограничения, связанные с минимальной и максимальной длительностью фаз. Учет ограничений на минимальные длительности фаз позволяет обеспечить длительность разрешающего сигнала, достаточную для перехода пешеходами проезжей части. Учет ограничений на максимальные длительности фаз позволяет избежать запрещающего сигнала слишком большой длительности, ведущей к увеличению числа нарушений ПДД и снижению безопасности движения.

В соответствии с изначально заданным временем переключения программ управления светофорным объектом дорожный контроллер включает необходимую программу в определенное время суток.

Адаптивное регулирование заключается в том, что продолжительность светофорного цикла или отдельных его фаз изменяется в определенных пределах в зависимости от транспортной нагрузки в реальном времени. Такое регулирование возможно при наличии обратной связи, реализуемой с помощью детекторов транспорта (или пешеходов), дающих информацию о некоторых параметрах транспортного потока. Управление производится по появлению заданного интервала (разрыва) в транспортном потоке. Адаптивное регулирование хорошо работает только при низких и умеренных интенсивностях движения, а при высоких интенсивностях движения оно переходит в режим жесткого программного регулирования с максимальной длительностью тактов [11].

Возможности применения мероприятий, направленных на снижение задержек МТС, в г. Полоцке. Перечень возможных мероприятий и мест их применения в Полоцке представлен в таблице 5.

Возможности применения мероприятий, направленных на снижение задержек МТС, в г. Новополоцке. Перечень возможных мероприятий и мест их применения в Новополоцке представлен в таблице 6.

Группа предлагаемых для Новополоцка мероприятий направлена на поэтапное формирование автобусного (в перспективе – трамвайно-автобусного) коридора в соответствии с «Рекомендациями по планированию устойчивой городской мобильности: Сделаем город удобным для жизни» (рисунок 4) [14; 15]. Формирование такого коридора позволит внести существенные функциональные изменения в структуру дорожной сети города с тенденцией постепенного «вытеснения» автомобильного движения на участки сети, проходящие по периферии жилой застройки. На рисунке выделены:

а) *желтым цветом* обозначен предлагаемый региональный автобусный коридор (дорога через д. Экимань 1-я – ул. Молодежная – ул. Ктаторова – ул. Промышленная), в котором предусматриваются ограничения автомобильного движения;

б) *синим цветом* обозначены основные улицы г. Новополоцка, на которых автомобильное движение сохраняется без дополнительных ограничений для обеспечения возможности подъезда ко всем существующим объектам;

в) *черным цветом* обозначен предусмотренный Генеральным планом города участок новой магистральной улицы, который предлагается построить в первоочередном порядке для возможности удобного автомобильного движения из восточной части Новополоцка на дорогу Новополоцк – Ксты с освобождением от транзитного автомобильного движения улицы д. Экимань 1-я;

г) *голубым цветом* обозначен планируемый мост через р. Зап. Двина, который должен быть обеспечен на обоих берегах реки транспортными узлами, параметры которых будут соответствовать перспективным транспортным потокам с учетом их нового распределения по направлениям.

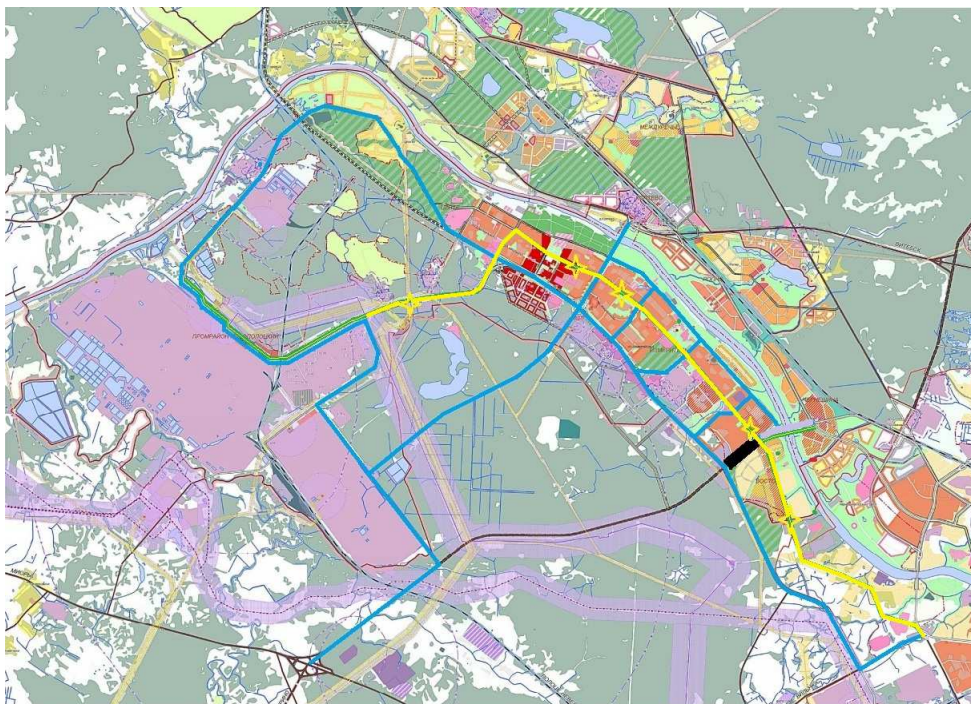


Рисунок 4. – Предлагаемый региональный автобусный «коридор» в структуре дорожной сети г. Новополоцка

Заключение. Дорожное движение – это сложный социально-производственный процесс, очень специфичный, опасный и дорогостоящий. В его организации имеются серьезные недостатки, которые приводят к большим общенациональным потерям. С ростом уровня автомобилизации эти потери будут неуклонно увеличиваться и необходимо немедленно принимать решительные меры. Именно поэтому в статье даны предварительные практические направления решения части проблем – за счет развития системы городского пассажирского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке. Эти мероприятия позволяют кардинально повысить качество дорожного движения без больших капиталовложений.

Предлагаемые мероприятия базируются на уже апробированных международных подходах, хорошо зарекомендовавших себя во многих странах мира и, безусловно, приемлемых для городов нашей страны при обеспечении необходимых условий их применения, а также на опыте отдельных внедренных мероприятий на отечественной улично-дорожной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире. Время действовать [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения. – Женева, 2009. – Режим доступа: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44122/2/9789244563847_rus.pdf. – Дата доступа: 14.01.2019.
2. Аудит безопасности дорожного движения / Д.В. Капский [и др.] ; науч. ред. Д.В. Капский. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 428 с.
3. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
4. Врубель, Ю.А. Опасности в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – М. : Новое знание, 2013. – 244 с.
5. Капский, Д.В. Методология повышения качества дорожного движения / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2018. – 372 с.
6. Исследование условий трамвайного движения на линии по ул. Красной – Коласа – Логойскому тракту в г. Минске / Д.В. Капский [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XI междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 15 марта 2018 г. В 2 т. / отв. ред. Д.А. Захаров. – Тюмень, 2018. – Т. 1. – С. 56–63.

7. Аспекты безопасности как основа совершенствования пассажирских перевозок трамваем путем применения транспортных средств повышенной вместимости (на примере г. Минска) / Д.В. Капский [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XI междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 15 марта 2018 г. В 2 т. / отв. ред. Д.А. Захаров. – Тюмень, 2018. – Т. 1. – С. 64–71.
8. Вибір оптимальної моделі збору та обробки інформації з метою реалізації диспетчерського управління рухом маршрутного пасажирського транспорту / Д.В. Капский [и др.] // Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. / ХНАДУ. – Харків, 2018. – С. 125–129.
9. Залучення автомобільного перевізника в електронний документообіг як перспективний напрямок в області підвищення ефективності логістичних процесів / Д.В. Капский [и др.] // Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. / ХНАДУ. – Харків, 2018. – С. 130–135.
10. Повышение эксплуатационных показателей работы тормозных систем трамваев за счет улучшения устойчивости и управляемости тормоза / Д.В. Капский [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Тюмень, 14 марта 2019 г. В 2 т. / отв. ред. Д.А. Захаров. – Тюмень : ТИУ, 2019. – Т. 1. – С. 199–206.
11. Исследование режима движения трамваев на линии по ул. Красной – Я. Коласа – Логойскому тракту / Д.В. Капский [и др.] // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. – 2018. – С. 59–62.
12. Улучшение условий движения трамваев на ул. Красной – Я. Коласа – Логойскому тракту средствами организации дорожного движения / Д.В. Капский [и др.] // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. – 2018. – С. 55–58.
13. Капский, Д.В. Оценка возможности использования троллейбусов и электробусов в Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.С. Семченков // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Тюмень, 14 марта 2019 г. В 2 т. / отв. ред. Д.А. Захаров. – Тюмень : ТИУ, 2019. – Т. 1. – С. 266–273.
14. Техническое обслуживание и ремонт городского электрического транспорта. Нормы и правила проведения : ТКП 314-2011 (02190) = Система технічного абслугоування і ремонту аўтаматычных устаноў пажаратушэння, сістэм супрацьдымавай бароны, пажарнай сігналізацыі, сістэм апавяшчэння аб пажары і кіравання эвакуацыяй. Арганізацыя і парадак правядзення работ. – Введ. 15.06.2011 (с отменой на территории Респ. Беларусь РД 25 964-90). – Минск : М-во по ЧС Респ. Беларусь, 2011. – 37 с.
15. Трамваи. Требования к техническому состоянию. Методы проверки : СТБ 1841-2009. – Введ. 01.09.2009. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2009. – 24 с.

Поступила 23.06.2020

DEVELOPMENT OF URBAN TRANSPORT IN THE CITIES OF POLOTSK AND NOVOPOLOTSK

**D. KAPSKIY, A. GOLOVNICH, T. VIGERINA, V. KUZMENKO,
A. KRASILNIKOVA, Ye. GORELIK, S. SEMCHENKOV, Ye. KOT**

The analysis of serious shortcomings in the organization of road traffic is given, which lead to large national losses, which tend to increase, which requires decisive measures.

Technological and organizational solutions based on proven international approaches that have proven themselves well in many countries of the world and, of course, acceptable for the cities of our country, provided the necessary conditions for their use are provided, as well as on the experience of certain implemented activities on street road network of our country.

Preliminary practical directions for solving part of the problems are given - through the development of the system of urban passenger transport in the cities of Polotsk and Novopolotsk. These measures will make it possible to radically improve the quality of road traffic without large capital investments; can be applied in other cities of the Republic of Belarus.

Keywords: urban transport, safety, passenger traffic, traffic lane, ring traffic, regulation.

УДК 656

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДОВ ПОЛОЦКА И НОВОПОЛОЦКА

*д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ²,
А.К. ГОЛОВНИЧ¹, В.Н. КУЗЬМЕНКО¹,
А.С. КРАСИЛЬНИКОВА¹, Е.Н. ГОРЕЛИК¹, С.С. СЕМЧЕНКОВ¹, Е.Н. КОТ¹*
¹(Белорусский национальный технический университет, Минск)
²(Полоцкий государственный университет)

Приведен анализ аварийности на дорогах в Полоцке и Новополоцке за пять лет. Количество ДТП к концу этого периода снизилось, но коэффициент тяжести возрос. Установлено распределение аварий по месяцам года, дням недели и времени суток. Наибольшее число аварий наблюдалось в осенне-зимний период с наиболее неблагоприятными погодными условиями. Большинство аварий произошло в будние дни, пик аварийности пришелся на середину недели. Распределение аварий по времени суток показало три выраженных пиковых периода: утренний (с 7 до 9 ч), обеденный (с 14 до 15 ч) и вечерний (с 17 до 20 ч). Утренний и вечерний пиковые периоды одинаково опасны по степени тяжести последствий аварий, но вечерний пик более растянут по времени. Около половины аварий произошло в темное время суток. Наибольшее число ДТП связано с наездами на пешеходов по причине нарушения правил проезда нерегулируемых пешеходных переходов. Плохое состояние покрытия проезжей части (гололед, мокрое покрытие, снежный накат) усугубляет увеличение числа аварий. Выявлены улицы Полоцка и Новополоцка, на которых произошло наибольшее число аварий, указаны их причины.

Установлен общий годовой объем выбросов в атмосферный воздух от всех дорожных транспортных средств с выделением доли выбросов от маршрутных транспортных средств, в том числе выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов. Предложены мероприятия по снижению аварийности и снижению выбросов в атмосферный воздух.

Ключевые слова: *городской транспорт, аварийность, анализ, выбросы в атмосферу.*

Введение. Основой устойчивого развития городов является система его маршрутного пассажирского, городского или общественного транспорта, которая позволяет повысить мобильность населения, снизить транспортную нагрузку, особенно на центральную и срединную части города, сократить негативное воздействие транспорта на окружающую среду [1–4]. Научно-исследовательским центром дорожного движения филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» были выполнены исследования по оценке существующего состояния транспортной системы г. Полоцка и Новополоцка по показателям аварийности и экологии.

Методы исследования. Анализ аварийности выполнен на основе методик, изложенных в монографии [5]. Для анализа были использованы данные аналитических сборников УГАИ МВД Республики Беларусь о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) с пострадавшими за пятилетний период и сведения, предоставленные межрайонным отделом (МО) ГАИ УВД Витебского облисполкома по обслуживанию г. Полоцка и Новополоцка и Полоцкого района. Проводился количественный, факторный и топографический анализы аварийности.

Расчетные объемы выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов от дорожных транспортных средств на 2018 г. отдельно для каждого из городов получены с использованием исходных данных (интенсивность, скорость и состав транспортного потока, планировочная структура дорожной сети г. Полоцка и Новополоцка). Эти объемы рассчитаны в соответствии с ТКП 17.08-03-2006 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах».

Основная часть. Общие показатели аварийности по данным аналитических сборников УГАИ МВД Республики Беларусь представлены в таблице 1.

В Полоцке за пятилетний период произошло 108 аварий, в которых погибли 11 человек и были ранены 107 человек. Тенденции снижения общего количества ДТП выявлено не было, однако в 2015–2016 гг. значительно снизился коэффициент тяжести аварий. В Новополоцке за аналогичный период произошло 119 аварий, в которых погибли 14 человек и были ранены 118 человек. В 2017 г. общее количество ДТП несколько снизилось, но коэффициент тяжести возрос.

Таблица 1 – Изменение основных показателей аварийности с пострадавшими в городах Полоцке и Новополоцке по годам

Годы	Погибшие	Раненые	Всего ДТП с пострадавшими	Коэффициент тяжести
<i>Полоцк</i>				
2013	2	17	16	10,5
2014	5	21	24	19,2
2015	1	25	25	3,8
2016	1	23	23	4,2
2017	2	21	20	8,7
<i>Новополоцк</i>				
2013	4	20	24	16,7
2014	2	28	27	6,7
2015	2	21	20	8,7
2016	3	29	29	9,4
2017	3	20	19	13,0

Распределение аварий по месяцам года (количественный анализ) в Полоцке показало два выраженных всплеска аварийности в августе–сентябре (27 аварий) и декабре (18 аварий). Наибольшее количество погибших в июне и декабре – по 2 человека в каждом месяце. В Новополоцке наблюдалось четыре всплеска аварийности в апреле (10 аварий), августе (11 аварий), октябре (18 аварий) и декабре–январе (35 аварий). Наибольшее количество погибших в октябре – 6 человек.

Распределение ДТП по сезонам года показало, что в Полоцке 58% аварий (в Новополоцке – 64%) произошло в осенне-зимний период с наиболее неблагоприятными погодными условиями. До 78% аварий в Полоцке (79% в Новополоцке) произошло в будние дни, пик аварийности пришелся на середину недели (среду – 20%, четверг – 19%).

Распределение аварий по времени суток показало три выраженных пиковых периода: утренний (с 7 до 9 ч), обеденный (с 14 до 15 ч) и вечерний (с 17 до 20 ч) (рисунок 1). Аналогичная картина наблюдалась и в Новополоцке. Утренний и вечерний пиковые периоды одинаково опасны по степени тяжести последствий аварий, но вечерний пик более растянут по времени.

Распределение аварий по годам с учетом их категорий и видов показало, что лидирующую позицию на протяжении всего пятилетнего периода занимают наезды на пешеходов, однако в 2017 г. их количество значительно снизилось (рисунок 1).



Рисунок 1. – Изменение количества ДТП по годам с учетом категории и вида ДТП

Распределение аварий по годам с учетом места их совершения показало, что на протяжении всего рассматриваемого периода наибольшее их количество происходило на нерегулируемых пешеходных переходах, не учитывая фоновую аварийность на перегонах.

Факторный анализ аварийности позволяет выявить наиболее вероятную причину аварий. При проведении анализа выявлена высокая доля аварий с пострадавшими с участием пешеходов 62–69%. Причиной является низкая степень защищенности этих участников движения, поэтому почти каждая авария с пешеходами фиксируется в учетных ДТП. Столкновение на перегоне составило 10–11%, столкновение на пересечении – 7–8%, наезд на препятствие – 7–13%, прочие ДТП – 6–7%.

Распределение аварий по категориям и видам в зависимости от степени тяжести последствий показало, что подавляющее количество произошло при наездах на пешеходов.

Распределение аварий с указанием нарушений требований Правил дорожного движения:

- нарушение правил проезда пешеходных переходов – 33–41%;
- управление ТС в состоянии опьянения – 2–7%;
- нарушение правил проезда перекрестков – 6–9%;
- переход проезжей части в неустановленном месте – 6–8%;
- выезд на полосу встречного движения – 1–5%;
- нарушение правил маневрирования – 4–8%;
- превышение установленной скорости движения – 1–3%;
- несоблюдение дистанции безопасности – 1–3%;
- нарушение правил перевозки пассажиров – 1–3%;
- исчезновение с места ДТП – 1–2%;
- управление ТС без водительского удостоверения – 1%;
- неожиданный выход пешехода из-за препятствия – 1–3%;
- другие нарушения – 18%.

Распределение аварий по причинам (нарушениям Правил дорожного движения) свидетельствует, что причина значительного количества пострадавших при наездах на пешеходов – нарушение правил проезда пешеходных переходов.

Плохое состояние покрытия проезжей части (гололед, мокрое покрытие, снежный накат) привело к ДТП в 39% случаях (рисунок 2). 42% аварий произошло в темное время суток, в 1% случаев освещение отсутствовало.

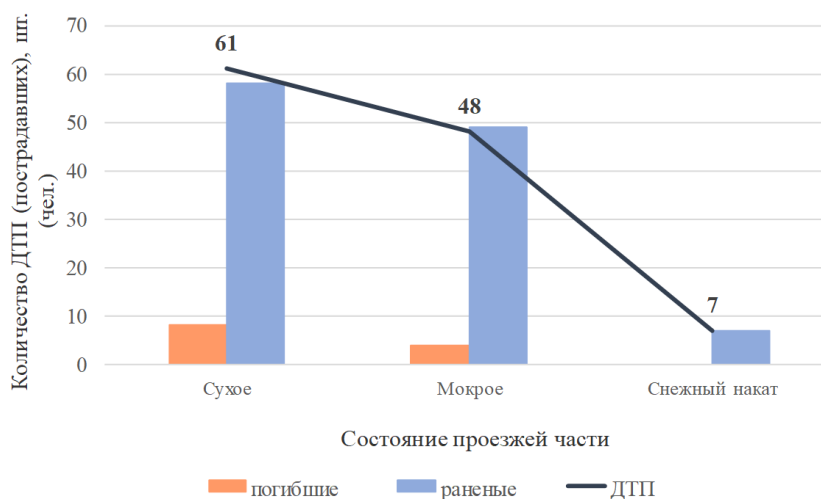


Рисунок 2. – Распределение ДТП в зависимости от состояния покрытия проезжей части

Наибольшее количество аварий по месту совершения произошло на нерегулируемых пешеходных переходах (25–37%) и на перегонных участках без выраженных конфликтных мест (49–51%), наименьшее – на перекрестках (нерегулируемых 4–5% и регулируемых 1–6%) и регулируемых пешеходных переходах (3–11%).

Распределение аварий по степени тяжести последствий в зависимости от места совершения ДТП показало, что наибольшее число пострадавших в авариях на нерегулируемых пешеходных переходах и перегонах улиц без выраженных конфликтных объектов – 42 человека (Полоцк) и 59 человек (Новополоцк) соответственно.

Топографический анализ аварийности позволяет распределить аварии по рассматриваемой местности в соответствии с адресом, привязанным к месту совершения ДТП. В Полоцке все аварии с пострадавшими за рассматриваемый период распределились по 26 улицам города. На девяти наиболее аварийных улицах зафиксировано 73% от общего количества ДТП с пострадавшими: ул. Октябрьская – 16, ул. П. Бровки – 14, ул. Богдановича – 10, ул. Зыгина – 8, ул. Космонавтов – 8, ул. Юбилейная – 7, пр-т Ф. Скорины – 6, Вильнюсское ш. – 5, ул. Коммунистическая – 5. На восьми улицах из названных организовано движение маршрутных транспортных средств, поэтому улучшение условий движения на этих улицах положительно скажется на качестве перевозки пассажиров.

В Новополоцке все аварии с пострадавшими были зафиксированы на 21 улице. На шести наиболее аварийных улицах зафиксировано 80 % от общего количества ДТП с пострадавшими: ул. Молодежная – 53, ул. Блохина – 13, ул. Калинина – 9, ул. Ктаторова – 8, ул. Я. Коласа – 5, ул. Комсомольская – 5.

На ул. Молодежной, по которой проходят все маршруты автобусов и маршрутных такси, произошло 28% аварий на нерегулируемых пешеходных переходах и перегонных участках, 21% аварий – на регулируемых пешеходных переходах. Поэтому улучшение условий дорожного движения на ул. Молодежной – один из способов повышения качества и безопасности перевозки пассажиров городским пассажирским транспортом в Новополоцке.

Наиболее аварийные конфликтные объекты на указанных улицах – нерегулируемые пешеходные переходы. Значительная часть аварий происходит на перегонных участках.

Общий годовой объем выбросов в атмосферный воздух от дорожных транспортных средств в двух городах составляет 36,3 тыс. т, в т.ч. выбросы загрязняющих веществ – 1,2 тыс. т (3,3%), выбросы парниковых газов – 35,1 тыс. т (96,7%).

Результаты расчета выбросов от общего транспортного потока, включая маршрутные транспортные средства (МТС), с распределением по видам выбрасываемых веществ приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. – Объемы выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в городах Новополоцке и Полоцке от общего транспортного потока

Город	Объем веществ, выброшенных в атмосферный воздух (т/год)								
	CO	NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂	SO ₂	NH ₃	N ₂ O
Новополоцк	379,38	106,68	40,22	3,95	2,95	16037,33	4,33	3,25	3,09
Полоцк	462,79	123,79	48,73	4,82	3,38	19007,97	5,16	4,08	3,86
Итого	842,17	230,47	88,95	8,77	6,33	35045,30	9,49	7,33	6,95

Таблица 3. – Объем выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в городах Новополоцке и Полоцке от маршрутных транспортных средств

Город	Объем веществ, выброшенных в атмосферный воздух (тонн/год)								
	CO	NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂	SO ₂	NH ₃	N ₂ O
Новополоцк	18,10	72,82	6,73	0,47	1,59	4680,59	1,04	0,02	0,20
Полоцк	17,12	66,25	6,77	0,39	1,19	4028,21	0,90	0,01	0,16
Итого	35,23	139,07	13,50	0,85	2,77	8708,80	1,94	0,03	0,36

Общий годовой объем выбросов парниковых газов в атмосферный воздух от дорожных транспортных средств суммарно в двух городах составляет 37,3 тыс. т CO₂ в эквиваленте.

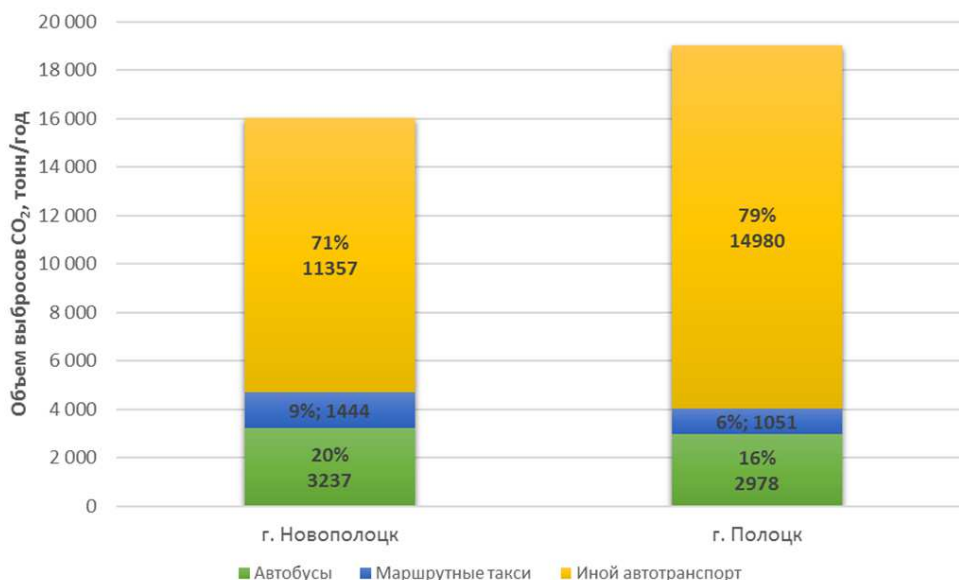


Рисунок 3. – Диаграмма распределения объемов выбросов CO₂ в городах Новополоцке и Полоцке по видам транспортных средств

На рисунке 3 представлена диаграмма распределения выбросов CO₂ в зависимости от вида транспортных средств (автобусы, маршрутные такси, другие дорожные транспортные средства).

Дополнительно был выполнен расчет выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ от транспортных средств ГПТ (автобусов и маршрутных такси), используемых на городских и «агломераци-

онных» маршрутах. Объем выбросов от МТС загрязняющих веществ составил 0,2 тыс. т (2,2% от всего объема выбросов от МТС), парниковых газов – 8,7 тыс. т (97,8% от всего объема выбросов от МТС).

Наибольшее сокращение выбросов парниковых газов может быть достигнуто при реализации мероприятий на «агломерационных» маршрутах № 5, 5т, 10, 10а, 10г Новополоцка и на маршрутах № 2, 4, 4э Полоцка.

Заключение. Приведен анализ аварийности в Полоцке и Новополоцке за пятилетний период, к концу которого общее количество ДТП снизилось, но коэффициент тяжести возрос.

Распределение аварий по месяцам года (количественный анализ) показывает выраженные всплески аварийности летом и в конце года. Наибольшее число аварий наблюдается в осенне-зимний период с наиболее неблагоприятными погодными условиями. Большинство аварий произошло в будние дни, пик аварийности пришелся на середину недели. Распределение аварий по времени суток показало три выраженных пиковых периода: утренний (с 7 до 9 ч), обеденный (с 14 до 15 ч) и вечерний (с 17 до 20 ч). Утренний и вечерний пиковые периоды одинаково опасны по степени тяжести последствий аварий, но вечерний пик более растянут по времени.

Лидирующую позицию на протяжении всего пятилетнего периода занимают наезды на пешеходов по причине нарушения правил проезда нерегулируемых пешеходных переходов. Плохое состояние покрытия проезжей части (гололед, мокрое покрытие, снежный накат) усугубляет увеличение числа аварий. Около половины аварий произошло в темное время суток. Выявлены улицы городов, на которых произошло наибольшее число аварий.

Общий годовой объем выбросов в атмосферный воздух от всех дорожных транспортных средств составляет 37,3 тыс. т CO₂ в эквиваленте. Выделен объем выбросов от маршрутных транспортных средств, в т.ч. выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов. Наибольшее сокращение выбросов парниковых газов может быть достигнуто при реализации мероприятий на «агломерационных» маршрутах города Новополоцка и на маршрутах города Полоцка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире. Время действовать [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения. – Женева, 2009. – Режим доступа: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44122/2/9789244563847_rus.pdf. – Дата доступа: 14.01.2019.
2. Аудит безопасности дорожного движения / Д.В. Капский [и др.] ; науч. ред. Д.В. Капский / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2015 – 428 с.
3. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
4. Врубель, Ю.А. Опасности в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – М. : Новое знание, 2013. – 244 с.
5. Капский, Д.В. Методология повышения качества дорожного движения / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2018. – 372 с.

Поступила 23.06.2020

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE TRANSPORT SYSTEM OF THE CITIES OF POLOTSK AND NOVOPOLOTSK

**D. KAPSKIY, V. IVANOV, A. GOLOVNICH, V. KUZMENKO,
A. KRASILNIKOVA, Ye. GORELIK, S. SEMCHENKOV, Ye. KOT**

The analysis of road accidents in Polotsk and Novopolotsk over a five-year period is given, while the total number of road accidents at the end of this period decreased, but the severity coefficient increased. Distribution of accidents by months of the year, days of the week and time of day has been established. The greatest number of accidents is observed in the autumn-winter period with the most unfavorable weather conditions. Most of the accidents occurred on weekdays, with the peak in the middle of the week. The distribution of accidents over the time of day showed three distinct peak periods: morning (from 7 to 9 h), lunch (from 14 to 15 h) and evening (from 17 to 20 h). The morning and evening peak periods are equally dangerous in terms of the severity of the consequences of accidents, but the evening peak is more extended in time. About half of the accidents occurred in the dark. The largest number of accidents is associated with collisions with pedestrians due to violation of the rules of travel of unregulated pedestrian crossings. The poor condition of the roadway surface (ice, wet surface, rolling snow) aggravates the increase in the number of accidents. The streets of Polotsk and Novopolotsk, where the largest number of accidents occurred, with an indication of their causes, were identified. The total annual volume of air emissions from all road vehicles has been established, with the allocation of the share of emissions from route vehicles, including emissions of pollutants and greenhouse gases. Measures are proposed to reduce accidents and reduce emissions into the atmosphere.

Keywords: urban transport, accident rate, analysis, atmospheric emissions.

УДК 621.113

**СОКРАЩЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММ-АНАЛИЗАТОРОВ****В.В. КОСТРИЦКИЙ, Д.С. ШЕВЧЕНКО, А.В. ПАВЧЕНКО**
(Полоцкий государственный университет)

Проанализированы существующие технологии диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Традиционные методики обладают большой трудоемкостью, и в зависимости от неисправности процесс диагностирования занимает от нескольких часов до нескольких дней. Установлено, что сократить количество затраченного времени и трудоемкость выполнения диагностических работ позволяет использование методов на основе современных информационных технологий. Методы диагностирования с использованием программ-анализаторов столь же точны, как и традиционные, однако имеют преимущество в том, что требуют значительно меньших временных затрат. Проведенные исследования показали, что при использовании таких методов трудоемкость процесса сокращается в 2,5–3 раза.

Ключевые слова: автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, диагностирование, программа-анализатор, тест.

Введение. Основным агрегатом автомобиля, на долю которого приходится наибольшее число отказов, является двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Надежность работы двигателей зависит не только от их конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации автомобилей, но в большой степени от организации и качества их обслуживания. Совершенство любого метода обслуживания и ремонта определяется тем, насколько полно он обеспечивает взаимодействие между объективно существующим процессом изменения технического состояния объекта и процессом его технической эксплуатации. Традиционный планово-предупредительный метод обслуживания и ремонта, основанный на выполнении профилактических работ определенных объемов через заранее запланированные интервалы времени или наработки независимо от состояния систем и деталей, обеспечивает слабое взаимодействие между указанными процессами. Более тесную связь между ними предоставляют методы обслуживания и ремонта по состоянию. Основным принципом данных является принцип предупреждения отказов систем автомобиля и их отдельных наиболее важных узлов и деталей при обеспечении максимально возможной их наработки до замены. Методы обслуживания и ремонта по состоянию предусматривают непрерывный или периодический контроль и измерение параметров, определяющих техническое состояние функциональных систем и узлов, т.е. осуществление непрерывного или периодического диагностирования данных объектов. При проведении технического обслуживания легковых автомобилей на диагностирование отводится около 15% от общей трудоемкости работ. Внешние признаки различных неисправностей ДВС могут быть одинаковы, для более точного определения технического состояния механизмов и систем двигателей используется ряд диагностических технологий и стандартное оборудование, позволяющие при последовательной проверке выявлять неисправность, что может занимать от нескольких часов до нескольких дней.

Существенное увеличение производительности технического обслуживания легковых автомобилей, качества выполняемых работ возможны при внедрении более совершенных технологий диагностирования. Проводимые при этом мероприятия отличаются относительно низким уровнем затрат, а время на их реализацию минимально [1; 2]. Эти методики призваны повысить эффективность и снизить трудоемкость работ. Таким образом, целью работы является сокращение трудоемкости диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания за счет использования современных технологий на основе передового программного обеспечения.

Основная часть. К методам с использованием современного программного обеспечения можно отнести программы-анализаторы: тест CSS и тест Rx. Эти тесты можно выполнить при помощи мотор-тестера USB Autoscope. Прибор универсален и не привязан к какой-либо автомобильной марке. Работает под управлением программы USB Oscilloscope. Подключается к USB 2.0-порту персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы Windows.

Тест CSS. Название этого теста происходит от первых букв немецкого названия датчика коленчатого вала – Crank Shaft Sensor. Сигнал датчика частоты вращения/положения коленчатого вала содержит большое количество информации о работе двигателя. В процессе работы каждый из цилиндров двигателя «подталкивает» коленчатый вал, за счет чего коленчатый вал кратковременно ускоряется после прохождения точек ВМТ 0° каждого из цилиндров. Если топливо в цилиндре не воспламенилось, происходит уже не ускорение, а замедление частоты вращения коленчатого вала. Даже когда блок управления

двигателем непрерывно регулирует частоту вращения коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу с целью поддержания оборотов в заданном диапазоне, толчки от работающих цилиндров присутствуют, а от неработающих отсутствуют. Сигнал от датчика коленчатого вала совместно с сигналом о моменте искрообразования в первом цилиндре содержит в себе информацию о значительном количестве параметров двигателя [3].

Анализ этих сигналов позволяет:

- оценить статическую и динамическую компрессию для каждого из цилиндров;
- выявить неисправности в системе зажигания;
- оценить состояние топливных форсунок;
- получить характеристику подсистемы опережения зажигания;
- выявить биение задающего зубчатого диска;
- выявить пропущенные и согнутые зубья задающего зубчатого диска.

Для анализа скрипту CSS нужны сигнал от датчика коленчатого вала и сигнал синхронизации с моментом воспламенения в одном из цилиндров.

Сигнал частоты вращения удобнее всего снимать со штатного датчика коленчатого вала, а сигнал синхронизации – с высоковольтного провода одного из цилиндров для бензиновых двигателей или управляющего сигнала топливной форсунки для дизельных двигателей. В зависимости от особенностей конструкции двигателя и устройства его системы управления могут применяться различные способы получения этих сигналов. Но, следует заметить, что такие сигналы можно снять практически с любого двигателя независимо от марки, модели и года выпуска [3].

В рамках данного теста диагностирование двигателя выполняется следующим образом.

Мотортестер USB Autoscope необходимо подсоединить к USB-порту компьютера. Затем подать питание на мотортестер от диагностируемого автомобиля. Подключить к мотортестеру высоковольтный датчик синхронизации с искрой в системе зажигания и установить на высоковольтный провод первого цилиндра. Затем подсоединить осциллографический щуп к входу № 5 USB Autoscope для снятия сигнала с датчика положения коленчатого вала (ДПКВ). Сигнальный щуп удобно подключить к сигнальному проводу ДПКВ при помощи иглы в разъем датчика. Открыть программу USB Oscilloscope и включить режим CSS.

Затем запустить двигатель и оставить работать его на холостом ходу. В окне программы включить запись данных и через несколько секунд поднять обороты до 3000 об/мин, затем резко закрыть дроссельную заслонку. Подождать холостого хода, после чего резко открыть дроссель. По достижению 4000 об/мин выключить зажигание. При этом дроссельная заслонка должна быть открыта до полной остановки двигателя. Выключить запись осциллограммы. Провести анализ записанных осциллограмм. Для этого в окне программы выбрать пункт «Выполнить скрипт».

В результате выполнения анализа его результаты будут представлены в окне программы «USB Oscilloscope» в нескольких вкладках отчета: отчет, эффективность, опережение, зубчатый диск. Из четырех вкладок нас интересует вкладка «Эффективность» [4].

Во вкладке «Эффективность» отображаются график частоты вращения коленчатого вала двигателя и графики эффективности работы для каждого из цилиндров. Серый график отображает изменение оборотов двигателя за все время проведения замеров, а цветные графики – отдачу от каждого из цилиндров (рисунок 1).

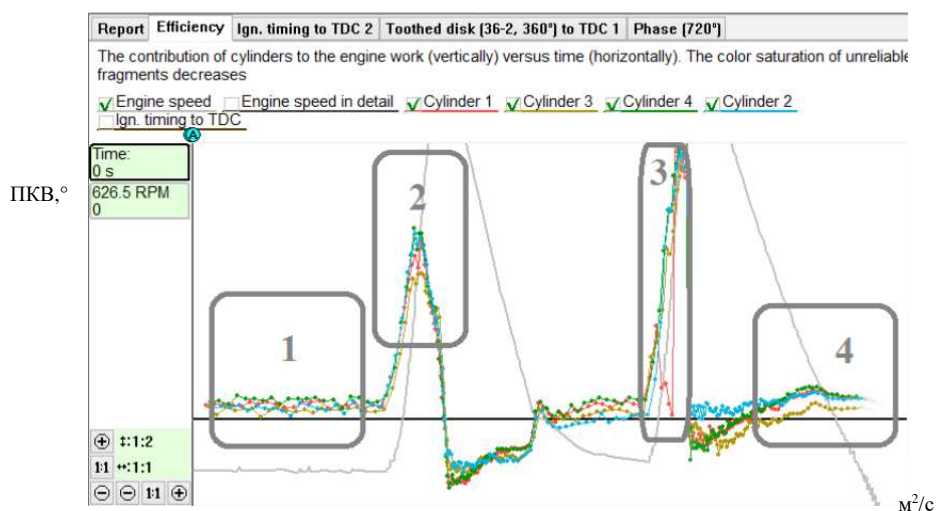


Рисунок 1. – Вкладка «Эффективность» из отчета скрипта CSS

Вкладка «Эффективность» является основной вкладкой отчета скрипта. Скрипт анализирует ускорение после воспламенения в каждом цилиндре, которое называется эффективностью цилиндра. Скрипт фиксирует эффективность цилиндра на протяжении всей работы двигателя и строит график эффективности цилиндра [4].

На эффективность работы цилиндра влияют 3 параметра: компрессия, надежное искрообразование и правильное соотношение компонентов топливо-воздушной смеси. По графикам эффективности можно выявить отклонения этих параметров и сделать предварительные выводы о состоянии механики двигателя, системе зажигания и системе топливоподачи.

Различные фрагменты цветных графиков позволяют оценить для каждого из цилиндров:

- 1) холостой ход – этот фрагмент позволяет оценить стабильность работы двигателя на холостом ходу;
- 2) состав топливо-воздушной смеси – здесь «проявляются» загрязненные форсунки и подсосы воздуха во впускной коллектор;
- 3) бесперебойность искрообразования – позволяет выявить неисправности в системе зажигания;
- 4) динамическая компрессия – по этому фрагменту можно выявить износ поршневых колец, неплотность клапанов газораспределения и ухудшенную наполняемость цилиндра воздухом.

Тест P_x. Тест P_x предназначен для автоматического анализа графика давления в цилиндре без воспламенения. Генерирует несколько вкладок отчета с рядом дополнительных параметров и характеристик двигателя и системы управления. Во вкладке «Отчет» рассчитываются пневматические и геометрические характеристики цилиндра, перечень обнаруженных отклонений выводится в форме текстовых сообщений. Во вкладках «Количество» и «Фазы» для улучшения удобства и наглядности исследования фаз газораспределения график преобразуется скриптом в диаграмму количества газа в цилиндре и выводится в двух формах представления. Во вкладке «Впуск» строится подробная диаграмма циклового наполнения цилиндра на такте впуска, характеризующая работу всего впускного тракта двигателя. Во вкладке «Выпуск» выводится диаграмма затрат энергии на очистку цилиндра от отработавших газов. При наличии дополнительного сигнала синхронизации с искрой зажигания, строится диаграмма угла опережения зажигания (УОЗ) и отображается во вкладке «Опережение» [5].

Для получения графика давления в цилиндре с последующим его анализом при помощи теста P_x применяется датчик, преобразующий давление в напряжение. Датчик давления вворачивается в диагностируемый цилиндр двигателя на место свечи зажигания. Если свечной колодец глубокий, то на входной штуцер датчика давления устанавливается удлинитель. Разъем датчика давления подключается к одному из каналов мотортестера. Высоковольтный провод цилиндра подключается к искровому разряднику с зазором. Разрядник при помощи зажима подключается к «массе» двигателя. Датчик синхронизации мотортестера устанавливается на этот же высоковольтный провод и подключается к соответствующему входу мотортестера.

В окне программы USB Oscilloscope из меню «Режимы» выбрать «P_x35» «P_x35+longer» в зависимости от того, используется удлинитель P_xLonger или нет. Вызвать меню «Запись» и через 3–5 с следует плавно поднять обороты двигателя до 3000–5000 об/мин с минимальным открытием дроссельной заслонки и сбросить [6].

После стабилизации холостого хода выполнить резкую перегазовку путем максимально резкого открытия дроссельной заслонки, затем сразу закрыть дроссель. В качестве альтернативы, вместо закрытия дросселя, можно выключить зажигание, а дроссель при этом удерживать открытым до полной остановки двигателя (за счет этого будет записана дополнительная информация для таких вкладок отчета скрипта, как «Впуск» и «Выпуск»).

Результаты исследований. В ходе исследования было проведено диагностирование двигателей 12 различных марок автомобилей двумя методами. Автомобили были разбиты на две группы.

Для диагностирования первой группы использовались традиционные технологии. В частности, измерялась компрессия в цилиндрах при помощи компрессометра, оценивалось давление в топливной системе при помощи топливного манометра, а также при помощи стенда для проверки форсунок определялась производительность, качество распыла и эффективность топливных форсунок; свечи зажигания проверялись на специальном стенде для выявления эффективности искрообразования, а для определения сопротивления высоковольтных проводов и сопротивления катушек зажигания использовали мультиметр.

Для диагностирования второй группы использовался мотортестер с программами-анализаторами CSS и P_x.

Все автомобили имели одинаковые признаки неисправностей, а именно потеря мощности, нестабильная и неравномерная работа двигателя на всех режимах. Такие признаки характерны при наличии неисправностей в системе зажигания, системе питания, а также в цилиндропоршневой группе и газораспределительном механизме бензинового двигателя.

При проведении диагностирования при помощи стандартных методик использовалось большое количество средств диагностирования для выявления неисправности, а поиск неисправности носил случайный характер (таблица 1).

Поскольку признаки неисправности характерны для разных систем двигателя, поэтому затраченное время на процесс диагностирования очень сильно зависело от изначально выбранного средства диагностирования. При этом выбор средства носил случайный характер, т.к. не представлялась возможным по имеющимся признакам определить однозначность выбора.

Таблица 1. – Трудоемкость диагностирования автомобилей при помощи традиционных методик

Марка автомобиля	Признаки неисправностей	Неисправность	Трудоемкость с использованием традиционных методов, чел.ч	Применяемые средства диагностирования
VW Polo 1,6 (2015)	Потеря мощности, нестабильная и неравномерная работа двигателя на всех режимах	Увеличенный зазор свечи зажигания	1,9	Компрессометр, манометр для проверки давления топлива, мультиметр, прибор для проверки свечей зажигания
VW Golf IV (2002)		Загрязнение изолятора свечи зажигания	3,6	Компрессометр, манометр для проверки давления топлива, мультиметр, прибор для проверки свечей зажигания, стенд для проверки и очистки форсунок
Skoda Octavia 1,6 (2008)		Разрушение высоковольтного провода	2,1	Компрессометр, манометр для проверки давления топлива, мультиметр, прибор для проверки свечей зажигания
Renault Logan (2009)		Неисправность форсунки второго цилиндра	3,8	Компрессометр, манометр для проверки давления топлива, мультиметр, прибор для проверки свечей зажигания, стенд для проверки и очистки форсунок
Hundai Sonata 2.0 (1997)		Сломанное компрессионное кольцо	0,2	Компрессометр
Peugeot 406 (2003)		Износ поршневых колец	1,75	Компрессометр, пневмотестер
Средняя трудоемкость:			2,3	

Так, для выявления неисправности автомобиля Renault Logan сначала измерялась компрессия, затем проводилась проверка элементов системы зажигания и давления в топливной системе. И только потом при оценке работы форсунок на стенде было выявлено, что форсунка второго цилиндра имеет более низкие показатели производительности, чем другие форсунки на всех режимах работы. Поэтому трудоемкость такого процесса составила 3,8 чел.ч.

А вот при диагностировании автомобиля Hundai Sonata при измерении компрессии была выявлено низкое давление в первом цилиндре. Причиной низкой компрессии оказалось сломанное компрессионное кольцо. При этом трудоемкость составила 0,2 чел.ч.

Таким образом, диагностирование по традиционным методикам достаточно трудозатратно, выявление неисправности во многом носит случайный характер и не позволяет в полной мере оценить все время на обслуживание и ремонт автомобиля.

В случаи диагностирования второй группы автомобилей при помощи программ-анализаторов CSS и Rx использовался мотортестер USB Autoscope (таблица 2).

Таблица 2. – Трудоемкость диагностирования автомобилей с использованием тестов CSS и P_x

Марка автомобиля	Признаки неисправностей	Неисправность	Трудоемкость с использованием традиционных методов, чел·ч	Применяемые средства диагностирования
Fiat Bravo 1,4 (2010)	Потеря мощности, нестабильная и неравномерная работа двигателя на всех режимах	Пробой изолятора свечи зажигания	0,5	USB Autoscope, тест CSS
Fiat Marea 1,6 (1996)		Неисправность форсунки первого цилиндра	0,5	USB Autoscope, тест CSS
Lada Vesta (2016)		Обрыв цепи управления провода форсунки	0,6	USB Autoscope, тест CSS
VW Tiguan 1,6 TFSI (2008)		Неисправность форсунки третьего цилиндра	0,5	USB Autoscope, тест CSS
Audi 100 C3 (1986)		Неправильная установка ремня ГРМ	0,75	USB Autoscope, тест CSS, тест P _x
Mazda 626 2,0 (2000)		Пробой по изолятору свечи зажигания, прогар клапана ГРМ	0,9	USB Autoscope, тест CSS, тест P _x
Средняя трудоемкость:			0,65	

При этом тест CSS использовали как основной, тест P_x как дополнительный, если были предположения предполагать, что признаки связаны с неисправностью в цилиндропоршневой группе или газораспределительном механизме.

При диагностировании автомобиля Fiat Marea при помощи теста CSS было установлена неправильная работа форсунки первого цилиндра (рисунок 2).

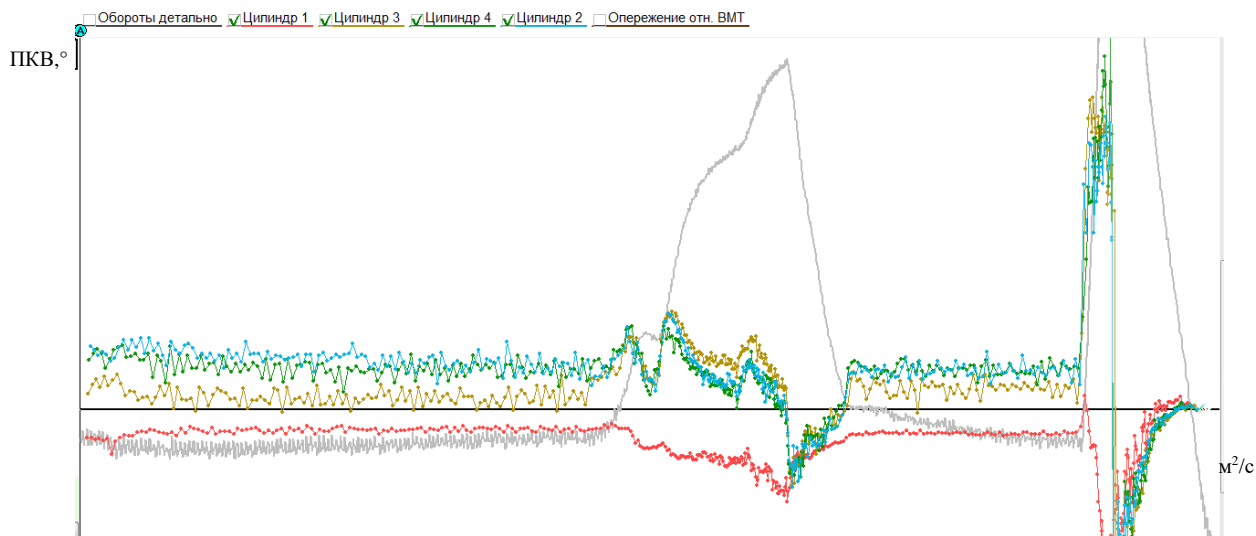


Рисунок 2. – Загрязнение топливной форсунки в первом цилиндре

Такое расположение графика свидетельствует о том, что форсунка не подает топлива, поэтому в цилиндр подается бедная смесь. Проблемы в цилиндропоршневой группе и в системе зажигания при помощи этого альтернативного теста выявлены не были. В этом автомобиле датчик коленчатого вала расположен таким образом, что для подключения к нему нам понадобилась осмотровая канава (т.е. подключались к датчику снизу автомобиля), поэтому трудоемкость на подключение и анализ результатов составила 0,5 чел·ч. График эффективности первого цилиндра находится ниже остальных на всех режимах работы двигателя.

После проведения теста CSS для автомобиля Mazda 626 во вкладке «Эффективность» заметно отклонение красного и желтого графиков, отражающих эффективность работы первого и третьего цилиндра (рисунок 3).

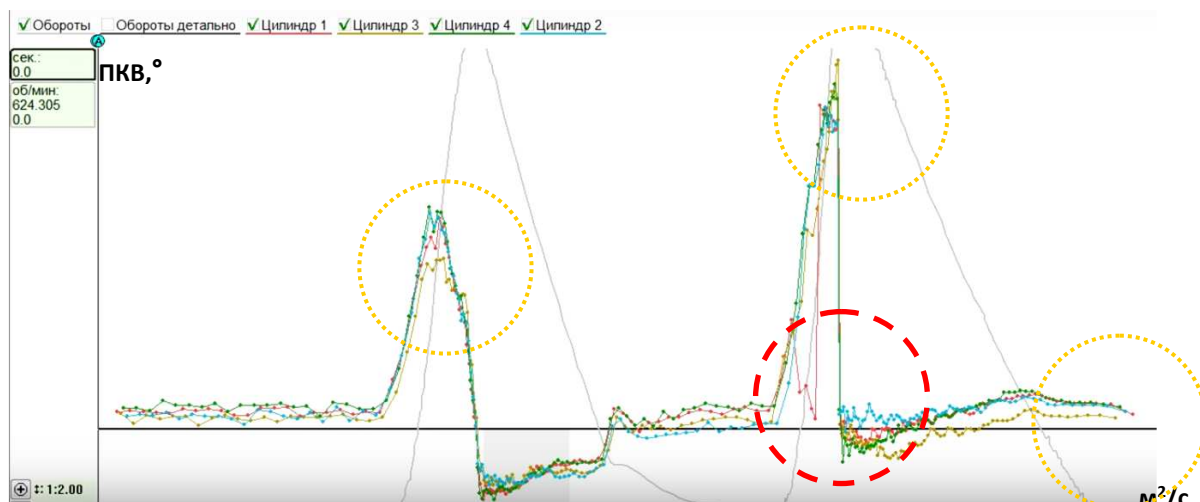


Рисунок 3. – Отклонение красного и желтого графиков

По графику эффективности первого цилиндра видны пропуски воспламенения во время резкой перегазовки, что указывает на проблему с искрообразованием в первом цилиндре. Отклонение в конце графика эффективности третьего цилиндра указывает на проблему с компрессией, что стало причиной снижения мощности, отдаваемой этим цилиндром. Графики эффективности второго и четвертого цилиндров не содержат признаков неисправности. Для этого автомобиля трудоемкость диагностирования составила 0,25 чел.ч.

Как оказалось, пропуски воспламенения в первом цилиндре под нагрузкой возникли из-за пробитой по изолятору свечи зажигания и ее высоковольтного наконечника. Причиной снижения компрессии в третьем цилиндре был прогоревший клапан.

При диагностировании автомобиля Audi 100 тестом CSS не было выявлено неисправностей. Хотя автомобиль имел характерные признаки неисправностей. Поэтому дополнительно проводился тест Rx. При помощи этого теста (вкладка «Фазы газораспределения» теста Rx) было установлено, что выпускной распределительный вал смещен относительно коленчатого вала против часовой стрелки. Это свидетельствует о неправильной установке ремня ГРМ при его замене (ремень ГРМ был смещен на 2 зуба относительно имеющихся меток) (рисунок 4). При этом трудоемкость составила 0,75 чел.ч.



Рисунок 4. – Вкладка «фазы газораспределения» теста Rx

На рисунке видно, что такт выпуска проходит раньше. График красного цвета не попадает в характерные поля, автоматически рассчитанные тестом.

Таким образом, методы диагностирования на основе тестов CSS и P_x столь же точны, как и традиционные, однако имеют преимущество в том, что требуют значительно меньших временных затрат.

Заключение. В результате исследований было установлено, что традиционные методики обладают большой трудоемкостью, и в зависимости от неисправности процесс диагностирования может занимать достаточно много времени. Кроме того, выявление неисправности во многом носит случайный характер и не позволяет в полной мере оценить все время на обслуживание и ремонт автомобиля. В свою очередь методы диагностирования на основе тестов CSS и P_x столь же точны, как и традиционные, однако имеют преимущество в том, что требуют значительно меньших временных затрат. При использовании таких методов трудоемкость процесса снижается в 2,5–3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабошин, А.А. Методика диагностирования поршневых двигателей внутреннего сгорания по результатам их косвенного индицирования : автореф. дис. ... канд. тех. наук / А.А. Бабошин. – СПб., 2013. – 23 с.
2. Герашенко, В.В. Методы и средства диагностирования и повышения эксплуатационных свойств автомобилей и их агрегатов / В.В. Герашенко, Н.А. Коваленко, В.П. Лобах. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 170 с.
3. Режим доступа: http://chiptuner.ru/content/pub_33/ – Дата доступа: 04.05.2020 г.
4. Режим доступа: http://injectorservice.com.ua/docs/publications/css_typical_examples.pdf – Дата доступа: 04.05.2020 г.
5. Филиппова, Е.М. Техническое состояние цилиндропоршневой группы и расход картерных газов / Е.М. Филиппова, Е.В. Николаев / Техника и оборудование для села. – 2011. – № 3. – С. 41–42.
6. Режим доступа: http://injectorservice.com.ua/px_sensor.php – Дата доступа: 07.10.2017 г.

Поступила 08.07.2020

REDUCE DIAGNOSTIC EMPLOYMENT PETROL INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING ANALYZER PROGRAMS

V. KOSTRITSKIY, D. SHEVCHENKO, A. PAVCHENKO

The existing technologies for diagnosing gasoline internal combustion engines are analyzed. Traditional methods are very laborious, and depending on the malfunction, the diagnosis process takes from several hours to several days. It has been established that the use of methods based on modern information technologies allows to reduce the amount of time spent and the complexity of performing diagnostic work. Diagnostic methods using analyzer programs are as accurate as traditional ones, however, they have the advantage of being significantly less time-consuming. Studies have shown that when using such methods, the labor intensity of the process is reduced by 2.5-3 times.

Keywords: *automobile, internal combustion engine, diagnostics, analyzer program, test.*

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 624.078.1/2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПОЯСОВ ПРИ УСТАНОВКЕ БАЛЛАСТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕФТЕПРОВОДЕ ПОД УГЛОМ В 30°

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, А.Н. ЯНУШОНОК, Н.А. БОГДАНОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Использование в процессе балластировки инвентарных утяжелителей, предназначенных для магистральных нефтепроводов большего диаметра, приводит к нарушению требований нормативных документов в части обеспечения их угла установки относительно вертикали. В связи с этим возникает задача определения возможности отступления от требований норм с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации данных конструкций. В статье рассмотрен вопрос возможности использования утяжелителей типа УБО-1020 на магистральных нефтепроводах DN 800. Приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы при статическом нагружении системы с целью определения действующих напряжений в элементах конструкций, а также результаты экспериментальных исследований стойкости изоляционного покрытия на истирание и/или сдвиг в результате возможных перемещений соединительных поясов блоков, обусловленных вибрационным воздействием перекачиваемой среды и перемещением грунта в результате действия сезонных природных факторов.

Ключевые слова: утяжелители (блоки), магистральный нефтепровод, соединительный пояс, математическое моделирование, экспериментальные исследования.

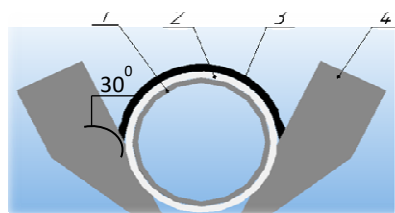
Введение. Одним из условий надежной и безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов является соблюдение их нормативной глубины залегания относительно поверхности земли. На трубопроводах, проходящих по заболоченным участкам, с целью предотвращения возможности всплытия необходимо использовать балластирующие устройства (утяжелители). По положению п. 9.6 ТКП [1] «утяжелители следует располагать на нефтепроводе без наклона в ту или другую сторону относительно вертикали. Допускается отклонение от вертикального положения не более 5°». Однако при проведении работ по установке балластирующих устройств типа УБО (устройство балластирующее охватывающее) могут быть использованы имеющиеся в наличии утяжелители, предназначенные для магистральных нефтепроводов большего диаметра, с соединительным поясом большей длины. В таком случае возникает проблема увеличения угла наклона относительно вертикали, который может превышать требования технического нормативного правового акта. Так, например, при производстве работ по установке утяжелителей на одном из магистральных нефтепроводов DN 800 ОАО «Гомельтранснефть Дружба» были использованы утяжелители типа УБО-1020. Установка данных утяжелителей привела к тому, что угол наклона от вертикального положения превысил требуемые 5° и составил 30°. Поэтому потребовалась проверка возможности использования данных утяжелителей с точки зрения обеспечения надежности и безопасности эксплуатации магистрального нефтепровода.

Основная часть. *Проведение математического моделирования.* При проведении анализа возможных последствий были выбраны следующие сценарии разрушения конструкции вследствие изменения угла установки утяжелителей:

- увеличение статических напряжений и разрушение соединительных поясов и/или изоляции вследствие уменьшения пятна контакта изоляция–соединительный пояс;
- смятие или истирание изоляционного покрытия магистрального нефтепровода при перемещении соединительного пояса вследствие подвижек грунта и вибрационных воздействий турбулентного потока перекачиваемой нефти.

При рассмотрении возможности реализации первого сценария разрушения было решено создать математическую модель и определить напряженно-деформированное состояние исследуемой системы нефтепровод–утяжелитель. Для создания модели на первом этапе были изучены составные элементы моделируемой системы, их геометрические параметры и характеристики используемых материалов. Для определения составных элементов данной системы использовались рабочие чертежи и технические

условия на изготовление утяжелителей типа УБО-1020 [2; 3], а также технические условия на изготовление труб с заводским антикоррозионным полимерным покрытием, используемых для магистральных нефтепроводов [4]. Основные компоненты и их взаимосвязи представлены на рисунке 1.



1 – нефтепровод; 2 – трехслойная изоляция с защитным покрытием в виде скального листа;
3 – соединительный пояс; 4 – блоки

Рисунок 1. – Составные элементы модели нефтепровод–утяжелитель типа УБО

Для моделирования были приняты следующие параметры компонентов системы:

- характеристика трубопровода: наружный диаметр – 820 мм, толщина стенки – 10 мм, материал трубопровода – сталь 17ГС;
- характеристика изоляции: заводская трехслойная типа ЗН-1, толщина – 3 мм, защита изоляции – скальный лист;
- соединительный пояс – 1-ПС 1020;
- характеристика блоков утяжелителей ТУ 102-300-81: длина L – 1500 мм, высота h – 1100 мм, геометрический объем – 0,907 м куб., объем бетона – 0,73 м куб., вес – 1680 кг.

Моделирование напряженно-деформированного состояния в конструкции проводилось с использованием метода конечных элементов. Анализ конструкций, сборных элементов, деталей и узлов осуществлялся с помощью системы SolidWorks Simulation, которая полностью интегрирована с SolidWorks [5–8]. Такой анализ позволил прогнозировать поведение компонентов в реальной среде путем виртуального тестирования САД-моделей. Помимо всего система обеспечивает анализ напряжения в конструкции, потери устойчивости, оптимизации, частотный и термический анализ, а также позволяет производить аналитические решения задач. В процессе моделирования создавались трехмерные модели всех перечисленных компонентов с соответствующими геометрическими параметрами и характеристиками. Каждый компонент (труба, трехслойная изоляция с защитным покрытием из скального листа, соединительный пояс, блоки) сопрягались друг с другом во взаимосвязях. Подготовленная сборка трехмерной модели всех компонентов представлена на рисунке 2.

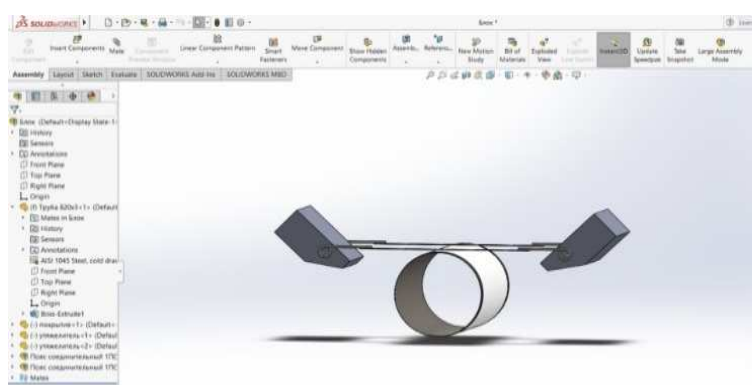


Рисунок 2. – Сборка трехмерной модели

Процесс «симуляции» напряженно-деформированного состояния системы. При проведении моделирования рассматривалась статическая линейно-упругая изотропная модель взаимодействия компонентов и использовался встроенный решатель FFEPlus, которому позволялось моделировать в т.ч. и при больших смещениях элементов модели. Для определения напряженно-деформированного состояния использовалось сплошное покрытие расчетной модели сеткой с размером ячейки 60 мм, как это представлено на рисунке 3.

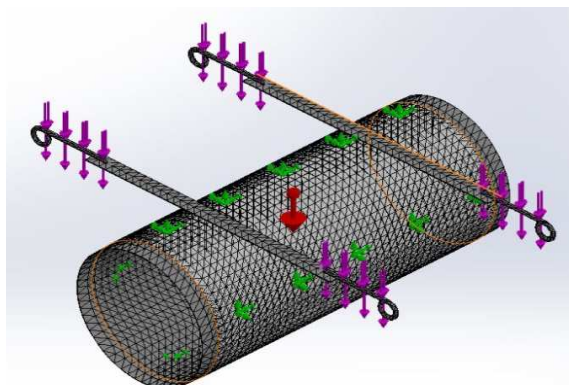


Рисунок 3. – Покрытая сеткой расчетная модель

В результате проведения расчета разработанной модели нефтепровода получено распределение напряжений и деформаций в анализируемых компонентах модели, которые визуальны представлены на рисунке 4.

В результате анализа полученных данных определена площадь пятна контакта соединительного пояса и изолированной поверхности нефтепровода (ширина которого равно 90 мм, длина дуги соприкосновения пояса и изоляции – 260 мм). Изменение угла отклонения утяжелителей в вертикальной плоскости менее 30° в процессе моделирования было запрещено, чтобы не увеличивать возможное пятно контакта и рассмотреть наихудший из возможных вариантов нагружения. Напряжение в металлической ленте соединительного пояса в результате воздействия нагрузки от блоков составит 238 МПа, при этом деформации пояса не наблюдалась. Изоляционное покрытие будет сжато, но его повреждения не произойдет. Дальнейшее моделирование увеличения нагрузки на нефтепровод до разрушения показало, что разрыв соединительного пояса произойдет при напряжениях 715 МПа и деформации (удлинении) пояса на 8,717 мм. При этом повреждения изоляции не наблюдается, а ее деформация (сжатие) составляет 1,38002 мм (рисунок 4).

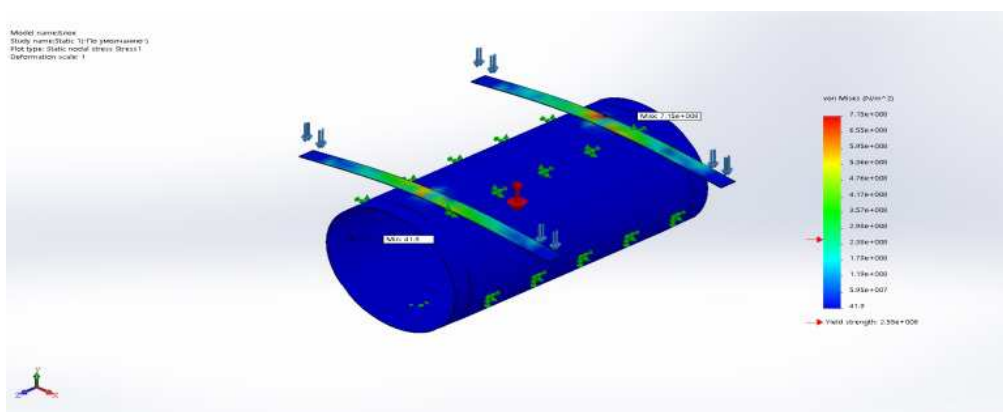


Рисунок 4. – Распределение напряжений в исследуемых компонентах

В результате проведенного расчета статической модели нефтепровода на прочность выявлено, что разрушения изоляции и соединительных элементов не произойдет. Напряжения в соединительных элементах составляют одну треть от напряжений, которые могут разрушить изоляцию. Таким образом, сделан вывод о возможности использования данных утяжелителей исходя из условий прочности при статическом нагружении.

Статическая модель нагружения нефтепровода с утяжелителями не рассматривала его возможные перемещения в результате вибраций и под действием внешних сил. При изменении пространственного положения нефтепровода возможно смещение соединительного пояса по нефтепроводу и повреждение его изоляции вследствие одновременного действия контактных напряжений от сжатия изоляции под действием веса утяжелителей и возникновения напряжений сдвига вследствие перемещения соединительного пояса по нефтепроводу. Оценку возможности повреждения изоляции вследствие трения соединительного пояса

производилась экспериментальным методом на испытательном стенде. Стенд для проведения испытаний представлял собой несущую конструкцию, собранную из элементов универсально-сборных приспособлений. Это позволило получить с одной стороны большую жесткость конструкции, а с другой – простоту монтажа, т.к. все элементы совместимы и взаимозаменяемы. Функционально стенд представлял собой переднюю и заднюю бабки, закрепленные на станине. Общий вид стенда представлен на рисунке 5.



Рисунок 5. – Общий вид испытательного стенда

Передняя бабка, закрепленная на станине слева, представляет собой узел, состоящий из двухступенчатого мотор-редуктора, обеспечивающего регулировку скорости 5–120 об/мин. На выходном валу мотор-редуктора закреплена сменная планшайба, на торце которой закреплён испытываемый образец, выполненный в виде кольца. Данная бабка может совершать только вращательное движение, осевому смещению вала препятствуют подшипники редуктора.

Задняя бабка закреплена на станине справа и представляет собой шток, закреплённый в опоре, с возможностью движения только в осевом направлении. С левой стороны на штоке смонтирована планшайба с закреплённым на ней испытываемым образцом, выполненным в виде диска. С правой стороны на торце штока смонтирован динамометр ДОС-0,2 (2 кН). Для выбора зазора и для создания испытательной нагрузки динамометр поджимается регулируемым упором универсально-сборного приспособления.

Для измерения числа оборотов подвижной планшайбы использовался индукционный датчик, формирующий один импульс за оборот вращающейся планшайбы.

Описание проведения эксперимента. Планшайбы с образцами монтировались на штатные места и приводились в соприкосновение посредством смещения штока. За счет регулируемого упора создается нагрузка на образцы 1,5 кН, контролируемая по динамометру. После этого включался мотор-редуктор. В ходе эксперимента контролировалась нагрузка на образцы и при необходимости корректировалась. Количество совершенных оборотов измерялось счетчиком, подсчитывающим импульсы с индукционного датчика. В качестве испытуемого образца использовалось кольцо с нанесенной полиэтиленовой изоляцией толщиной 3 мм, защищенной слоем скального листа. Наружный диаметр кольца составил 60 мм, его ширина 7 мм, что создало напряжения сжатия в изоляции, близкие к определенным по результатам математического моделирования, равные 2,5 МПа. В первом периоде эксперимента наблюдалось значительное сжатие материала скального листа (0,3–0,5 мм), после чего размер стабилизировался. В дальнейшем наблюдался достаточно линейный износ (0,02–0,03 мм) за 30 мин при 20 об/мин (проходимый путь 3,77 м/мин). Далее эксперимент был прекращен, т.к. получаемые результаты позволили сделать вывод об отсутствии значительных повреждений изоляции вследствие трения ленты утяжелителей в процессе эксплуатации.

Заключение. Проведенные исследования с использованием разработанной математической модели нефтепровода DN 800 с утяжелителями типа УБО-1020 показали, что напряжения в соединительных поясах утяжелителей и в изоляции нефтепровода не критичны. Работоспособность и долговечность нефтепровода при таком нагружении обеспечивается, трубопровод выдержит вибрацию под действием внешних сил, смещение соединительного пояса не произойдет. Данная работа, проведенная на кафедре трубопроводного транспорта и гидравлики, позволила трубопроводной организации ОАО «Гомельтранснефть Дружба» использовать установку утяжелителей на нефтепроводе под углом наклона от вертикального положения больше 5°.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительство магистральных нефтепроводов. Конструкции и балластировка : СТП 09100.20001.012-2018. – Взамен ТКП 419-2012 (09100).
2. Утяжелители бетонные охватывающие для магистральных трубопроводов. Рабочие чертежи. Проект № 999Б. Миннефтегазстрой. Главное техническое управление. Экспериментально-конструкторское бюро.
3. Утяжелители сборные железобетонные охватывающего типа УБО : ТУ 102-300-81. – Введ. 01.11.1981. – М. : ВНИИСТ, 1981. – 69 с.
4. Трубы стальные электросварные диаметром до 1420 мм с наружным антикоррозионным полиэтиленовым покрытием для строительства магистральных нефтепроводов : ТУ 14-3 Р-67-2003. – Введ. 01.09.2003. – М. : ВНИИСТ, 2003. – 33 с.
5. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
6. Dassault Systemes. Новые возможности SolidWorks 2019. – USA : Waltham : Dassault Systemes (DS) SolidWorks Corp., 2019. – 242 с.
7. Бате, Н. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Н. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.
8. Голованов, А.П. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций / А.П. Голованов, О.Н. Тюленева, А.Ф. Шигабутинов. – М. : Физматлит, 2006. – 392 с.

Поступила 18.06.2020

**DETERMINATION OF CONDITIONS OF OPERATION OF CONNECTING BELTS
AT INSTALLATION OF BALLASTING ELEMENTS ON OIL PIPELINE
AT AN ANGLE OF 30 °**

L. SPIRIDENOK, A. YANUSHONOK, N. BOGDANOVICH

The use of inventory weighting agents intended for larger oil trunk pipelines during the ballasting process violates the requirements of regulatory documents in terms of ensuring their installation angle relative to the vertical. In this regard, the problem arises of determining the possibility of deviation from the requirements of the standards from the point of view of ensuring the safe operation of these structures.

The article presents some results of a study of the technical condition of pipelines operating for 44 years. The issues of increasing the reliability of trunk pipelines that have worked for a long time due to reductive heat treatment of ring welded joints are considered. The effectiveness of applying the non-destructive method for controlling the mechanical properties of metal directly on the main pipeline (after heat treatment at specified conditions) is evaluated.

Keywords: *weighting agents (blocks), oil trunk pipeline, connecting belt, mathematical modeling, experimental studies.*

УДК 665.642.4

**ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ СЫРЬЯ
НА ВЫХОД И КАЧЕСТВО ПРОДУКТОВ
ПРОЦЕССА ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ (ОБЗОР)**

**АЙЮБ ЗЕЙН АЛАБДИН, канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК
(Полоцкий государственный университет),
канд. техн. наук, доц. А.И. ЮСЕВИЧ**

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Представлено обобщение литературных данных о влиянии свойств компонентов сырья на выход и качество продуктов процесса замедленного коксования нефтяных остатков. Рассмотрена взаимосвязь выхода продуктов процесса коксования с показателями качества сырья: коксуемостью, плотностью, соотношением С/Н. Проанализированы тенденции изменения свойств, группового химического состава нефтяных остатков и выхода из них кокса с увеличением температуры начала кипения. Представлены различия свойств прямогонных и крекинг-остатков, влияние их химического состава на выход и качество кокса; возможные причины формирования структуры нефтяного кокса. Рассмотрены требования к сырью для получения кокса с высокой анизотропией. Исследована взаимосвязь структуры образующегося кокса с коллоидной устойчивостью и реологическими свойствами коксующейся среды, а также связь показателей качества сырья с образованием в процессе замедленного коксования дробьевого, или «shot», кокса. Проанализированы тенденции изменения выхода и свойств продуктов коксования от происхождения и свойств сырья. Рассмотрено распределение соединений серы по компонентам сырья процесса коксования и взаимосвязь содержания серы в коксе с механизмом жидкофазного термоллиза нефтяных остатков. Показано, что путем изменения свойств, состава сырья и его активации с использованием принципов физико-химической механики нефтяных дисперсных систем, существует возможность целенаправленного регулирования выхода и показателей качества продуктов процесса замедленного коксования.

Ключевые слова: замедленное коксование, компоненты сырья, свойства, дисперсные системы, коллоидная стабильность, выход продуктов, качество продуктов, общие закономерности, структура нефтяного кокса.

Введение. Установки замедленного коксования (УЗК) в составе современных нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) играют важную роль в обеспечении глубины переработки нефти и наряду с нефтяным коксом позволяют получать большое количество светлых нефтепродуктов и газа. Возможность переработки на УЗК различного сырья (тяжелые нефтяные остатки, крекинг-остатки, тяжелые газойли каталитического крекинга, остатки масляного производства, смола пиролиза, нефтешламы и пр.) в сочетании со сравнительно невысокими капитальными и эксплуатационными затратами определяет его особое значение при совершенствовании и оптимизации действующих и разработке перспективных схем переработки нефти. Наличие в схеме завода УЗК высокой производительности также дает возможность НПЗ быстрее адаптироваться к изменению состава перерабатываемой нефти [1; 2].

Процесс замедленного коксования обеспечивает эффективную термодесфальтизацию и деметаллизацию нефтяных остатков, что позволяет использовать образующийся в процессе тяжелый газойль коксования в качестве компонента сырья для установок гидрокрекинга вакуумных газойлей. Таким образом, УЗК в составе НПЗ связывает в единый технологический цикл процессы первичной и глубокой переработки нефти, производство топлив, комплексы по получению смазочных масел и сырья для нефтехимической промышленности, обеспечивая при этом безотходность производства.

Первостепенное влияние на выход и показатели качества продуктов, получаемых в процессе замедленного коксования, оказывает состав и качество поступающего на переработку сырья. Основным компонентом сырья УЗК являются вакуумные остатки первичной переработки нефти (гудроны) с добавкой тяжелых остатков термодеструктивных и термокаталитических процессов, а также побочных продуктов масляного производства, свойства которых зависят от свойств исходного сырья и технологического режима проведения процессов, в ходе которых они получены. Смешивание вышеперечисленных компонентов позволяет регулировать показатели качества и коллоидную устойчивость сырья процесса замедленного коксования.

Настоящий обзор посвящен обобщению литературных данных о влиянии свойств компонентов сырья на выход и качество продуктов процесса замедленного коксования нефтяных остатков.

Исследовательская часть. Качество сырья процесса замедленного коксования оценивают по следующим показателям: коксуемость, плотность, групповой химический состав, а также содержание

сернистых, металлосодержащих соединений, солей и механических примесей [3]. Требования к качеству сырья зависят от целевого назначения процесса коксования – максимальное получение дистиллятных фракций или производство анодного и игольчатого кокса.

Для прогнозирования выхода кокса чаще всего применяется показатель, характеризующий коксуемость сырья, определяемый методом Конрадсона (CCR – Conradson carbon residue) [4]. Однако использование только CCR позволяет прогнозировать выход кокса из перерабатываемого сырья на установках УЗК с погрешностью, которая может достигать (± 25)% [6]. При этом прослеживается следующая закономерность – при увеличении значения показателя CCR выход кокса, бензина и газов в процессе замедленного коксования увеличивается, а выход газойлевых фракций уменьшается.

Коксуемость нефтяных остатков тесно связана с их плотностью. При повышении плотности растут и коксуемость остаточных нефтепродуктов. Это связано с увеличением содержания в них смол и асфальтенов. Поэтому с утяжелением сырья наблюдаются закономерности, аналогичные увеличению его CCR [7].

Выход кокса находится в прямой зависимости от коксуемости и плотности сырья. Но эти зависимости нелинейны. При коксовании высокосмолистых остатков выход кокса превышает коксуемость сырья примерно в 1,5 раза, а при коксовании остатков с пониженной коксуемостью – в 1,8–2 раза [8]. О нелинейности выхода кокса в процессе замедленного коксования от коксуемости сырья свидетельствуют результаты исследований, опубликованные в работе [9]. Путем сопоставимости результатов термогравиметрического анализа (ТГА) сырья с выходом продуктов на лабораторной установке процесса замедленного коксования выявлено, что для сырья с высоким содержанием ароматических углеводородов и асфальтенов результаты сопоставимы, а для сырья с высоким содержанием смол – нет. Зависимость изменения выхода кокса в процессе замедленного коксования высокосмолистого сырья носит экстремальный характер. С увеличением содержанием смол в сырье выход кокса в процессе замедленного коксования вначале увеличивается, затем начинает снижаться. В то же время выход коксового остатка по данным ТГА монотонно возрастает. Это свидетельствует о различии интенсивности и характера процессов, протекающих в сырье с высоким содержанием смол в условиях ТГА и замедленного коксования, и невозможности в полной мере опираться на результаты ТГА исследуемого сырья при прогнозировании выхода продуктов в процессе коксования.

В работе [10] в качестве критерия для прогнозирования выхода продуктов в процессе замедленного коксования предлагается использовать показатель – углеродородный фактор, представляющий собой отношение массового содержания в сырье углерода и водорода (С/Н). Изучена взаимосвязь коксуемости и группового состава сырья с соотношением С/Н. Выявлены закономерности изменения выхода продуктов коксования. Установлено, что с ростом соотношения С/Н у прямогонного сырья в диапазоне от 6,5 до 10 выход кокса и бензина увеличивается, выход газойлей и газов снижается. В результате регрессионного анализа данных лабораторных исследований получены уравнения, позволяющие прогнозировать выход продуктов в процессе замедленного коксования. Показано, что путем изменения глубины отбора при вакуумной перегонке мазута и компаундирования прямогонных остатков можно регулировать выход продуктов в процессе коксования.

С увеличением глубины отбора вакуумного нефтяного остатка возрастают его коксуемость, плотность, соотношение С/Н, снижается отношение выхода кокса к CCR остатка, уменьшается выход остатка на исходную нефть, увеличивается выход кокса на остаток, при этом выход кокса на нефть падает [11]. Увеличение температуры начала кипения гудрона оказывает влияние на его групповой и химический состав – снижается содержание парафино-нафтеновых углеводородов, увеличивается концентрация смолисто-асфальтеновых веществ, соединений серы и металлов.

Очевидно, что кроме свойств сырья на выход и качество продуктов оказывают влияние и технологические параметры процесса замедленного коксования, в частности, температура, давление и коэффициент рециркуляции. Учитывая вышесказанное, прогнозирование выхода продуктов в процессе коксования первичного сырья, состоящего из компонентов различного происхождения, только по плотности, коксуемости и соотношению С/Н неизбежно будет иметь большую погрешность. В связи с этим для более точного прогнозирования выхода продуктов разрабатываются более сложные зависимости, представляющие собой регрессионные уравнения, полученные путем статистической обработки данных, включающие в качестве независимых переменных, как свойства сырья, так и технологические параметры процесса коксования [5; 12].

В качестве сырья процесса замедленного коксования помимо прямогонных остатков могут быть использованы остатки вторичного происхождения (крекинг-остатки, тяжелые газойли каталитического крекинга, смолы пиролиза), остатки масляного производства (асфальты деасфальтизации, экстракты селективной очистки масляных фракций). Остатки вторичного происхождения имеют достаточно существенные отличия от прямогонных остатков как по соотношению высокомолекулярных углеводородов и асфальто-смолистых веществ, так и по химическому составу компонентов. Структура смол и асфальтенов, выделенных из крекинг-остатков, даже при близком соотношении С/Н отличается расположением

конденсированных циклов в пространстве, что обуславливает их неодинаковое поведение в процессе термодеструкции и сказывается на количестве и качестве получаемых промежуточных и конечных продуктов.

Влияние химического состава и свойств нефтяных остатков различного происхождения на выход и качество кокса рассмотрено в обзоре [13]. Введение в сырье коксования добавок с высоким содержанием коксообразующих компонентов способствует увеличению выхода кокса. Дистиллятные крекинг-остатки характеризуются повышенной концентрацией ароматических углеводородов и низким содержанием золы. Выход из них кокса выше, чем при коксовании прямогонного сырья. Получаемый из дистиллятных крекинг-остатков кокс имеет небольшой выход летучих, пониженное содержание серы по сравнению с исходным сырьем, незначительное содержание ванадия и других зольных элементов.

Качество и происхождение сырья определяет не только выход, но и структуру кокса, от которой зависит его дальнейшее использование [3]. Рядовой кокс, получаемый в процессе замедленного коксования, выглядит как губка. Поэтому его называют губчатый, или *sponge*, кокс. Из специально подготовленного сырья может быть получен кокс как изотропной, так и анизотропной структуры. Наиболее ценным видом кокса, который может быть получен в процессе замедленного коксования, является игольчатый, или *needle*, кокс, который используется при производстве крупногабаритных графитированных электродов, применяемых при выплавке стали в электросталеплавильных печах.

В качестве сырья для производства игольчатого кокса традиционно используются: дистиллятные крекинг-остатки от крекирования малосернистых или гидрообессеренных газойлевых фракций прямогонного или вторичного происхождения, очищенные от катализаторной пыли тяжелые газойли каталитического крекинга, смолы процесса пиролиза. Сырье должно иметь высокую плотность, повышенное содержание конденсированных ароматических углеводородов и низкое содержание веществ, не растворимых в бензоле, отсутствие компонентов нерастворимых в хинолине, умеренную коксуюемость и содержание асфальтенов, низкую зольность и содержание серы. Высокое содержание серы в коксе приводит к растрескиванию электродных заготовок в процессе их графитизации [14; 15].

Нефтяные коксы с высокой анизотропией можно получить только из ароматизированных дистиллятных видов сырья с низким содержанием гетероорганических соединений. Это связано с химическими превращениями компонентов сырья под действием температуры и особенностями процесса замедленного коксования.

Коксование представляет собой сложный химический процесс, включающий протекание реакций термического крекинга молекул исходного сырья и реакций полимеризации, конденсации и уплотнения продуктов крекинга, приводящих через жидкокристаллическое (мезофазное) состояние к образованию кокса. Таким образом, процесс образования кокса в жидкой фазе можно разделить на три основные стадии [5]:

– на первой стадии в результате протекания реакций термодеструкции и конденсации происходит накопление в жидкой фазе высококонденсированных ароматических углеводородов. Стадия сопровождается образованием пека;

– на второй стадии в коксуемой массе формируются жидкие кристаллы – мезофаза. Чтобы добиться ориентированной укладки слоев в жидком кристалле, необходима достаточно высокая подвижность макромолекул в коксуемой массе. Для образования достаточно крупных кристаллов мезофаза должна сохранять пластичность в течение длительного времени. Для получения анизотропного кокса в коксуемой массе не должно быть карбоидов, т.к. они блокируют рост жидкого кристалла. Коксуемая масса в момент образования мезофазы не должна содержать много асфальтенов, т.к. они могут привести к образованию большого количества зародышей и быстрой потере пластичности. В результате будет образовываться кокс с менее упорядоченной структурой;

– на третьей стадии в результате отщепления от макромолекул основной массы водорода, метильных групп и части гетероатомов образуются твердые кристаллиты кокса.

Термический крекинг является эндотермическим процессом. Для его протекания требуется подвод тепла извне. Реакции уплотнения протекают с выделением тепла. Наиболее склонны к реакциям уплотнения и образованию кокса ароматические углеводороды, смолы и асфальтены. Предельные углеводороды, в частности алканы, в процессе коксования преимущественно подвергаются термическому крекингу. Циклоалканы занимают промежуточное положение. Непредельные углеводороды играют значительную роль в процессах образования кокса. При этом они склонны к взаимодействию как друг с другом с образованием олигомеров и полимеров, так и с ароматическими углеводородами. Суммарный тепловой эффект процесса замедленного коксования эндотермический. Однако чем выше плотность исходного сырья и содержание в нем компонентов, склонных к реакциям уплотнения, тем эндотермический эффект процесса будет ниже. В результате перепад температуры по высоте камеры коксования уменьшится, т.е. средняя температура увеличится, что приведет, при прочих равных условиях, к интенсификации процессов термического крекинга. В итоге выход кокса станет ниже, но его плотность увеличится.

Кокс, полученный из высокопарафинистого сырья, из-за значительного перепада температур между верхом и низом камеры коксования при одинаковых технологических параметрах проведения процесса содержит больше летучих веществ и имеет меньшую механическую прочность, чем кокс из высокоароматизированного сырья.

Пространственная молекулярная структура обуславливает малую подвижность компонентов крекинг-остатков остаточного происхождения. Компоненты крекинг-остатков дистиллятного происхождения содержат молекулы, сконденсированные, главным образом, в двухмерной плоскости, что позволяет им иметь повышенную подвижность. Для характеристики подвижности остатка может быть использована величина, зависящая от температуры размягчения и коксуемости сырья, – фактор качества сырья (ФКС) [16]. Чем более подвижен остаток (выше значение ФКС), тем более он пригоден для получения кокса специального назначения. При одинаковой коксуемости сырья выход кокса из крекинг-остатка всегда больше, чем из гудрона той же нефти. При этом выше истинная плотность кокса.

Для получения кокса анизотропной структуры необходимо сырье, богатое конденсированными ароматическими соединениями с короткими боковыми радикалами, не содержащее твердых карбоидных частиц, и с низким содержанием серы и металлов. Конденсированные ароматические соединения с короткими боковыми цепями в процессе карбонизации формируют жидкокристаллическую фазу – мезофазу, образование и рост которой в дисперсионной среде является предпосылкой будущей упорядоченной, в идеале – игольчатой, структуры кокса. Благоприятная молекулярная структура сырья способствует формированию гексагональной углеродной сетки, близкой к структуре графита. Длинные алкильные цепи алкиларенов сырья препятствуют образованию упорядоченной решетки кокса.

Большое содержание в коксующейся массе карбоидных частиц способствует образованию кокса изотропной структуры. Такой кокс плохо графитируется и практически не проводит ток, что связано с присутствием в нем молекул фуллеренов [3]. Предполагается, что подобные структуры образованы из сырья, содержащего карбоиды, которые по своему строению схожи с термической сажей. Одним из способов модифицирования сырья процесса коксования при получении кокса изотропной структуры является введение в него технического углерода [17].

В ходе процесса замедленного коксования может образовываться кокс в виде твердых круглых шариков или гранул размером с картель и крупнее. Такой кокс называют дробьевидным, или *shot*, коксом. Губчатый кокс может содержать гранулы дробьевидного кокса. Образование дробьевидного кокса в процессе коксования нежелательно, т.к. это может нарушить работу коксового барабана. Из-за высокой плотности слоя кокса не удастся провести его эффективное охлаждение. Возможны проблемы с выгрузкой и гидрозрезкой кокса. Дробьевидный кокс имеет низкое содержание летучих веществ и высокую прочность. Ухудшается его показатель размолоспособности по Хардгроу (HGI – Hardgrove grindability index).

Образованию дробьевидного кокса способствуют высокие температуры проведения процесса коксования. Нижним пределом возможного образования такого кокса является температура на входе вторичного сырья в камеру коксования (483–486) °С [18]. Однако доминирующим фактором является качество исходного сырья, в частности, его плотности. При плотности сырья 10° API и более (1000,0 кг/м³ и менее) образование дробьевидного кокса маловероятно [19].

Качество сырья оказывает влияние на выход и свойства газов и дистиллятных фракций процесса коксования. Выход газа при коксовании гудрона несколько выше, чем при коксовании крекинг-остатков, что обусловлено меньшей степенью ароматизации молекул, входящих в состав гудрона. Наибольшее относительное количество газов, по сравнению с коксованием смол и масел, выделяется в процессе коксования асфальтенов. При одинаковом технологическом режиме коксования и газоразделения газы коксования асфальта деасфальтизации и крекинг-остатка (по сравнению с газами коксования гудрона и экстракта) имеют более высокое суммарное содержание метана и этана. При этом содержание в газах олефинов почти в 2 раза меньше [12]. При коксовании дистиллятных крекинг-остатков содержание сероводорода в газе значительно ниже, чем при коксовании гудрона, что свидетельствует о большей термостабильности входящих в крекинг-остаток сероорганических соединений [20].

Различия в качестве исходного сырья больше сказываются на составе и свойствах газойлевых фракций и в меньшей степени на свойствах бензина коксования. Так, при повышении плотности, коксуемости и снижении содержания в сырье парафинафтеновых углеводородов незначительно растет плотность бензина (за счет увеличения содержания в нем ароматических и нафтеновых углеводородов и снижения содержания парафинов) и резко увеличивается содержание в нем серы. Утяжеление сырья, особенно введение в его состав остатков термического крекинга, способствует существенному увеличению плотности легкого и тяжелого газойлей коксования за счет увеличения содержания в них полициклических ароматических соединений. При этом наблюдается рост содержания в газойлях коксования серы и снижение содержания олефинов [5].

Важнейшим показателем качества получаемого кокса, определяющим область его применения, является содержание в нем серы. Высокое содержание серы в коксе ухудшает его качество, является причиной растрескивания изделий при их производстве и термообработке, загазованности производственных помещений и окружающей среды.

Как правило, чем больше серы в сырье, тем больше ее в коксе. Однако в ряде случаев можно наблюдать ситуацию, когда содержание серы в коксе существенно выше содержания серы в сырье, и наоборот. При коксовании прямогонных нефтяных остатков содержание серы в коксе относительно содержания ее в сырье обычно возрастает, а при коксовании крекинг-остатков – снижается. При этом количественной оценки, которая бы позволила прогнозировать величину соотношения содержания серы в коксе и сырье, пока не существует, и можно надежно оценить ее только экспериментально [11].

Основными причинами получения кокса с различным содержанием серы являются неравномерное ее распределение по компонентам нефтяных остатков и различная реакционная способность смеси этих компонентов в процессе карбоидообразования. Максимум содержания серы в гудроне приходится на спиртобензолные смолы и тяжелые ароматические углеводороды, а в крекинг-остатке – на легкие и средние ароматические углеводороды. Для легких ароматических углеводородов крекинг-остатков, содержащих максимальное количество серы, характерен минимальный коэффициент реакционной способности, тогда как для спиртобензолных смол гудрона этот коэффициент максимален, т.е. основные коксообразующие компоненты крекинг-остатков обладают меньшим серосодержанием, чем аналогичные компоненты гудрона. Легкие и средние ароматические углеводороды крекинг-остатков, обладающие максимальным серосодержанием и минимальной реакционной способностью, не вовлекаясь в процесс коксования, удаляются из зоны реакции и обуславливают высокое содержание серы в газойлях [21].

Повышение содержания серы в мальтенах остатков коксования свидетельствует, что в них концентрируются сераорганические соединения преимущественно циклического характера. Одновременно повышается степень ароматичности мальтенов вследствие протекания реакций дегидрополиконденсации ароматических и нафтеноароматических углеводородов. Атомарный водород, выделяющийся в ходе этих реакций, способствует гидрогенолу соединений серы. Интенсивное образование карбоидов при коксовании гудрона и, как следствие, быстрая потеря подвижности коксующейся массы затрудняет молекулярные перегруппировки с участием водорода и диффузию продуктов разложения сернистых соединений за пределы этих структурных элементов коксующейся массы [22], т.е. возникает так называемый клеточный эффект, характерный для жидкофазного термолитического разложения нефтяных остатков.

Важным показателем качества нефтяного кокса является его зольность. Высокое содержание золы в коксе ограничивает его применение в электродной промышленности, ухудшает электротехнические качества кокса (электропроводность, удельное электросопротивление). Зольность кокса зависит от содержания в сырье механических примесей, солей и металлоорганических соединений. Соли и механические примеси попадают в нефть с пластовыми водами при ее добыче в виде растворимых и нерастворимых (пески и глины) веществ, а также при зашлаковывании нефтей. Металлоорганические соединения в основном содержатся в смолисто-асфальтеновых веществах прямогонных нефтяных остатков и в тяжелых продуктах их крекинга. В связи с этим кокс с низкой зольностью можно получать только из дистиллятных крекинг-остатков или из деасфальтизованного остаточного сырья [20].

Снижению зольности кокса, получаемого из остаточного сырья, способствует глубокое обессоливание, а также максимальное удаление механических примесей из нефти. Помимо повышения зольности кокса, содержащиеся в сырье соли и механические примеси, могут оседать в реакционных змеевиках печи, и вызывать их закоксовывание. Особенно нужно обратить внимание на стадию зашлаковывания нефти. Так, в работах [23; 24] установлено, что при увеличении содержания в сырьевой смеси натрия выше 15 мг/кг наблюдается существенное сокращение продолжительности непрерывной работы печи установки замедленного коксования.

На интенсивность отложения кокса в змеевике печи влияет также коллоидная устойчивость сырья процесса коксования, зависящая от его группового состава. Согласно современным представлениям остатки от переработки нефти представляют собой нефтяные дисперсные системы (НДС), основным структурным элементом которых являются сложные структурные единицы (ССЕ) [25; 26]. Известно, что основным структурообразующим компонентом в НДС являются асфальтены. Растворимость, а следовательно, и коллоидная устойчивость асфальтенов в карбонизирующей системе зависят от растворяющей способности дисперсионной среды. Хорошими растворителями асфальтенов являются ароматические углеводороды, плохими – парафины и парафинонафтеновые углеводороды. Коллоидную устойчивость асфальтенов можно повысить путем увеличения содержания в системе высокомолекулярных ароматических углеводородов и смол, которые, в соответствии с их потенциалом межмолекулярного взаимодействия, формируют сорбционно-сольватную оболочку. Образование карбенов и, в конечном итоге, кокса происходит лишь при достижении пороговой концентрации асфальтенов, зависящей от растворяющей способности дисперсионной среды.

В связи с вышесказанным сырье процесса коксования нефтяных остатков можно рассматривать с позиций физико-химической механики нефтяных дисперсных систем (НДС), согласно которым путем различных физических и химических воздействий можно целенаправленно регулировать, помимо коллоидной устойчивости компонентов сырья, их реакционную способность, а значит, выход и качество получаемого кокса. В работе [27] был выявлен механизм ступенчатого фазового перехода при образовании кокса. Показано, что качество кокса зависит от соответствия скорости вырождения сольватной оболочки ССЕ изменению технологических факторов (в первую очередь температуры) процесса.

На основании ряда исследований, результаты которых систематизированы в работе [28], сделан вывод, что в процессах термополиконденсации высокомолекулярных углеводородных систем выход углеродистых продуктов определяется не только химической природой сырья, но и энергией активации его вязкого течения, которая является мерой энергии межмолекулярного взаимодействия и связана с коксуемостью нефтяных пеков. В высокотемпературных процессах реакционная способность и свойства высокомолекулярных систем определяются их реологическими свойствами. При этом выход кокса в технологических процессах коксования зависит, прежде всего, от реологических свойств сырья в вязкотекучем состоянии.

В работе [29] показано, что по реологическим характеристикам сырья, в частности по продолжительности сохранения его текучести в ходе процесса коксования, можно судить о структуре получаемого кокса. Так, на кривых изменения вязкости во времени у нефтяных асфальтитов наблюдается небольшой период отверждения. Для дистиллятных крекинг-остатков, наоборот, при идентичных температурах область отверждения значительно шире, т.е. текучесть сохраняется дольше. Первый тип сырья дает плохо графитизирующийся мелкозернистый кокс, второй – кокс игольчатой структуры. Чем дольше коксующаяся масса находится в вязкотекучем состоянии, т.е. сохраняет агрегативную устойчивость, тем продолжительнее стадия жидкофазного термоллиза компонентов сырья, больше образуется дистиллятных продуктов, ниже выход кокса, при этом его структура более анизотропна. При этом асфальтены и образовавшиеся из них карбоиды более длительное время находятся в объеме без осаждения в отдельную фазу и претерпевают более глубокие химические превращения – обрыв боковых цепочек, образование крупных блоков поликонденсированных ароматических структур и т.д.

Высокая реакционная способность и склонность к структурообразованию у асфальтенов обусловлена их парамагнетизмом [30]. Формирование вокруг асфальтенов оболочки из диамагнитных молекул препятствует их укрупнению. При этом в условиях термического крекинга продолжительность и эффективность стабилизирующего действия диамагнитных молекул будет определяться их термической стабильностью.

Нефтяные остатки представляют собой коллоидные системы, в которых асфальтены стабилизированы смолами. Такая система является устойчивой в области температур, при которых смолистые соединения не разлагаются. В условиях крекинга поверхностные свойства смол исчезают и создаются условия для коагуляции асфальтенов [31]. Помимо смол асфальтены способны притягивать и ароматические углеводороды. Хотя последние и менее поверхностно активны, чем смолы, они обладают более высокой термической стабильностью. В результате асфальтены удерживаются в диспергированном состоянии, и хотя часть из них превращается в карбоиды, в среде с высоким содержанием ароматических углеводородов они не укрупняются и сохраняют высокую седиментационную устойчивость.

В работах [32; 33] установлено, что наибольшим стабилизирующим эффектом по отношению к асфальтенам в процессе термической деструкции обладают гомологи нафталина с числом углеродных атомов в цепи не более двух и имеющих ассиметричное строение. При их добавлении в сырье достигается максимальное снижение вязкости крекинг-остатков, а частицы образующихся карбоидов имеют наименьший размер. Использование в качестве добавки в сырье термокрекинга полициклических ароматических углеводородов не дает заметного эффекта ни по снижению вязкости крекинг-остатка, ни по уменьшению размеров карбоидов. Это явление связано с меньшей термической стабильностью полициклических ароматических углеводородов по сравнению с бициклическими, а также особенностями их термодеструкции. В соответствии с двухканальной схемой превращений групповых компонентов сырья жидкофазного термоллиза, полициклические ароматические углеводороды в процессе термокрекинга могут превращаться в карбоиды, минуя стадию перехода в асфальтены [11].

Потенциально регулировать коллоидную устойчивость сырья и выход продуктов на стадии жидкофазного термического крекинга процесса коксования можно путем введения различных активирующих добавок, содержащих в своем составе поверхностно-активные вещества, обладающие пептизирующими и стабилизирующими свойствами по отношению к асфальтенам и карбоидам. При этом ожидается, что такие добавки повлияют как на выход, так и на свойства продуктов процесса замедленного коксования [34; 35].

Заключение. Путем изменения свойств, состава сырья и его активации с использованием принципов физико-химической механики нефтяных дисперсных систем существует возможность целенаправленного регулирования выхода и показателей качества продуктов процесса замедленного коксования. Но из-за сложного химического состава и коллоидной природы сырья, а также процессов, протекающих на стадиях жидкофазного термолитического разложения, образования мезофазы пека и нефтяного кокса, достаточно точное прогнозирование влияния свойств компонентов сырья на выход и качество продуктов в промышленном процессе замедленного коксования нефтяных остатков является крайне сложной задачей. В подавляющем большинстве случаев надежные результаты можно получить только экспериментально. При этом необходимо учитывать не только свойства сырья, но и технологические параметры процесса коксования, а также индивидуальные особенности отдельно взятой промышленной установки замедленного коксования.

Выявленные и систематизированные в настоящей работе общие закономерности изменения выхода и качества продуктов в зависимости от свойств сырья процесса коксования могут быть использованы для первичного выбора направления оптимизации состава сырья по заданному критерию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Направления развития процесса замедленного коксования в схемах отечественных нефтеперерабатывающих заводов / Р.Г. Габбасов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2010. – Т. 8, № 2 – С. 90–93.
2. Эллиот, Дж.Д. Замедленное коксование: новаторство и перспективы / Дж.Д. Эллиот // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2010. – № 2. – С. 9–17.
3. Капустин, В.М. Технология переработки нефти. В 4 ч. / В.М. Капустин, А.А. Гуреев. – М. : Химия, 2015. – Ч. 2 : Физико-химические процессы. – 400 с.
4. Ancheyta, Jorge. Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum / Jorge Ancheyta. – USA : CRC Press, 2013. – P. 551.
5. Ежов, Б.М. Проблемы развития производства электродного кокса / Б.М. Ежов. – Уфа : БАШНИИ НП, 1975. – Вып. XIII. – 322 с.
6. Основные процессы нефтепереработки. Справочник : [пер. с англ. 3-го изд.] / Р.А. Мейерс [и др.] ; под ред. О.Ф. Глаголевой, О.П. Лыкова. – СПб. : Профессия, 2011. – 944 с.
7. Kayode, Coker. Petroleum Refining Design and Applications. Handbook / Coker Kayode. – Scrivener Publishing, 2018. – 640 p.
8. Бендеров, Д.И. Процесс замедленного коксования в необогреваемых камерах / Д.И. Бендеров, Н.Т. Походенко, Б.И. Брондз. – М. : Химия, 1976. – 176 с.
9. The use of thermogravimetry as a means of predicting the performance of coke in delayed coking of a residue of Venezuelan origin / Meza Alejandra [et al.] // Journal of Thermal Analysis & Calorimetry. – 2019. – Vol. 137, Is. 4. – P. 1329–1339.
10. Кузора, И.Е. Эффективность процесса замедленного коксования при многовариантных режимах работы : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.17.07 / И.Е. Кузора. – Ангарск, 2007. – 169 л.
11. Современные и перспективные термолитические процессы глубокой переработки нефтяного сырья / Г.Г. Валявин [и др.] ; под ред. С.А. Ахметова. – СПб. : Недра, 2010. – 224 с.
12. Albers, John E. Modeling of a delayed coker. A thesis in chemical engineering. Submitted to the Graduate Faculty of Texas Tech University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of science in chemical engineering / John E. Albers. – 1992. – P. 92.
13. Варфоломеев, Д.Ф. Сырье коксования и эффективность его использования / Д.Ф. Варфоломеев, А.И. Стехун. – М. : ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1987. – 55 с.
14. Процесс замедленного коксования и производство нефтяных коксов, специализированных по применению / Г.Г. Валявин [и др.] // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2011. – № 8. – С. 44–48.
15. Хайрудинов, И.Р. Перспектива расширения сырьевой базы для получения игольчатого кокса / И.Р. Хайрудинов, А.А. Тихонов, М.М. Ахметов // Башк. хим. журнал. – 2011. – Т. 18, № 3. – С. 103–111.
16. Сюняев, З.И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса / З.И. Сюняев. – М. : Химия, 1973. – 296 с.
17. Способ получения изотропного кокса : пат. RU 2 639 904 : МПК C10B 55/00 // В.П. Запорин, С.В. Сухов, Р.А. Шайбаков, А.В. Ситдикова ; дата публ.: 25.12.2017.
18. Красюков, А.Ф. Нефтяной кокс / А.Ф. Красюков. – М. : Химия, 1966. – 264 с.
19. Lieberman, Norman P. Troubleshooting Process Operations / Norman P. Lieberman. – Fourth Edition. – PennWell Corporation, 2009. – 762 p.
20. Ахметов, М.М. Получение малосернистых коксов из сернистых нефтей / М.М. Ахметов – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2010. – 180 с.
21. О природе серы в нефтяных коксах / Д.Ф. Варфоломеев [и др.] // Химия твердого топлива. – 1984. – № 4. – С. 128–132.
22. Ахметов, М.М. Механизм удаления серы и формирования углеродной матрицы сернистых коксов на стадиях карбонизации и кристаллизации / М.М. Ахметов // Химия твердого топлива. – 1991. – № 2. – С. 88–100.
23. Advances in delayed coking heat transfer equipment / K.A. Catala [et al.] // Hydrocarbon Processing. – 2009. – Vol. 88, No. 2. – P. 45–54.

24. Влияние концентрации натрия на коксуюемость исходного сырья в змеевиках печей на установке замедленного коксования в ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» / А.Ю. Глухов [и др.] // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Химическая технология и биотехнология. – 2015. – Вып. 4. – С. 161–172.
25. Сюняев, З.И. Нефтяные дисперсные системы / З.И. Сюняев, Р.З. Сафиева, Р.З. Сюняев. – М. : Химия, 1990. – 224 с.
26. Туманян, Б.П. Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем / Б.П. Туманян. – М. : Техника, 2000. – 335 с.
27. Кузеев, И.Р. Структурная организация нефтяных пеков / И.Р. Кузеев, Д.В. Куликов, А.А.Хайбуллин // Нефть и газ. – 1997. – № 4. – С. 93–101.
28. Физико-химические особенности термолитиза сложных углеводородных систем. Эксперимент. Теория. Технология / Г.Г. Валявин [и др.] ; под ред. проф. М.Ю. Долматова. – СПб. : Недра, 2017. – 352 с.
29. Зиннуров, Э.Х. Применение вискозиметрических характеристик нефтяных остатков для совершенствования процесса коксования : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Э.Х. Зиннуров. – М., 1984. – 199 л.
30. Унгер, Ф.Г. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов / Ф.Г. Унгер, Л.Н. Андреева. – Новосибирск : Наука, 1995. – 192 с.
31. Высокосернистые нефти и продукты их переработки : Тр. БАШНИИ НП / под ред. Г.И. Каледова. – М. : Химия, 1968. – Вып. VIII. – 296 с.
32. Антипенко, В.Р. Влияние термообработки на реакционную способность компонентов остаточных фракций нефтей различных типов / В.Р. Антипенко, О.А. Ершова // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 314, № 3. – С. 122–127.
33. Низамова, Г.И. Закономерности кинетики жидкофазного термолитиза и совершенствование технологии процесса висбрекинга : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Г.И. Низамова. – Уфа, 2016. – 125 л.
34. Промотированный висбрекинг гудрона / Н.Н. Белов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1989. – № 12. – С. 6–8.
35. Комплексная переработка остаточных продуктов процессов вторичной переработки нефти [Электронный ресурс] : курс лекций / А.А. Ермак [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 35 с. – Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/20882>. – Дата доступа: 14.04.2020.

Поступила 16.06.2020

INFLUENCE OF PROPERTIES OF RAW MATERIAL COMPONENTS ON THE YIELD AND QUALITY OF PRODUCTS OF THE PROCESS OF DELAYED COKING OF OIL RESIDUES (OVERVIEW)

AYUB ZANE ALADIN, A. YERMAK, A. YUSEVICH

A summary of literature data on the influence of the properties of raw material components on the yield and quality of products of the process of delayed coking of oil residues is presented. The relationship between the output of products from the coking process and the quality of raw materials: coking capacity, density, C/N ratio is considered. The trends of changes in the properties, group chemical composition of oil residues and the output of coke from them with an increase in the boiling point are indicated. Differences in the properties of straight-run and cracking residues, the influence of their chemical composition on the yield and quality of coke are considered. Possible reasons for the formation of the structure of petroleum coke are analyzed. The requirements for raw materials for obtaining coke with high anisotropy are considered. The relationship between the structure of the resulting coke and colloid stability and rheological properties of the coking medium is shown. The relationship of raw material quality indicators with the formation of shot-shaped or "shot" coke during slow coking is considered. Trends in the yield and properties of coking products from the origin and properties of raw materials are analyzed. The distribution of sulfur compounds in the raw materials components of the coking process and the relationship of the sulfur content in the coke with the mechanism of liquid-phase thermolysis of oil residues are considered. It is shown that by changing the properties, composition of raw materials and its activation using the principles of physical and chemical mechanics of oil dispersed systems, it is possible to purposefully regulate the yield and quality indicators of products of the delayed coking process.

Keywords: *delayed coking, raw material components, properties, dispersed systems, colloidal stability, product yield, product quality, general patterns, structure of petroleum coke.*

УДК 662.758.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА
БИОДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ И ИХ СМЕСЕЙ**

*канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ, канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА,
Т.А. РУДИНСКАЯ
(Полоцкий государственный университет)*

В последнее время в мире увеличилось производство биотоплива и биотопливных добавок в существующие виды топлива, в частности растительного масла в дизельное топливо. Как правило, это сопряжено с возникновением ряда трудностей при анализе качества топливных смесей, т.к. они образуют азеотропную смесь. Изучены особенности перегонки азеотропных смесей дизельного топлива с растительным маслом. Для определения зависимостей температур кипения от концентрации были взяты смеси дизельного топлива и растительного масла различной концентрации и произведена их фракционная перегонка на приборах стандартной дистилляции AD86 5G и микродистилляции PMD-100. Проведены исследования эффективности применения и свойств биодизельных топливных композиций. Представлен фракционный состав этих топлив. Приведены основные характеристики и мировой опыт использования отходов растительных масел.

Ключевые слова: биодизельное топливо, фракционный состав, кипение.

Введение. Истощение нефтяных месторождений и продолжающийся рост цен на нефть и нефтепродукты делают неизбежным все более широкое использование в дизельных двигателях биотоплив на основе растительных масел. Перевод дизелей на биотоплива позволит не только обеспечить замещение топлив нефтяного происхождения топливами, производимыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но и заметно снизить токсичность отработавших газов и улучшить экологическую ситуацию в городах и сельской местности [1–3].

Идея использовать растительные масла в качестве топлив для дизельных двигателей была выдвинута еще при создании первых таких моторов. Однако с освоением нефтяных запасов в XX в. более выгодным оказалось топливо из нефти. Сейчас биодизельное топливо часто отождествляют с рапсовым маслом, которое действительно стало основным сырьевым источником «биодизеля» в Европе (здесь основное биодизельное топливо – метиловый эфир рапсового масла). Однако биодизельное топливо можно получать и из других масел, например, подсолнечного, пальмового или соевого. Любое биодизельное топливо представляет собой смесь растительных масел. В растительном содержатся жиры – эфиры жирных кислот с глицерином.

Растительные масла и их эфиры, как и спирты, отличаются агрессивностью ко многим материалам, традиционно используемым в двигателях и топливной системе автомобилей. В последние годы большинство европейских производителей выпускают машины, допускающие использование смесей нефтяного топлива с биодизельным в количестве 5–20%. Добавление биодизельного компонента в количестве до 5% обычно считается приемлемым для любых двигателей, не адаптированных к биотопливу. Достаточно активно биодизельное топливо внедряется и в США, где в качестве сырья используют чаще всего соевое масло. Еще один перспективный источник биодизельного топлива – отработанные пищевые масла. Возможно использование для этих же целей животных жиров.

Производство биодизельных топлив на основе растительных масел и животных жиров постоянно расширяется. Так, в 2000 г. выпуск биодизельного топлива в мире составил около 9,2 млн т, в 2009 г. его объем достиг 55,9 млн т, а в 2018 г. – около 91,3 млн т. Мировыми лидерами по производству биодизельных топлив являются США, Индонезия, Бразилия, Германия, Франция, Аргентина и Китай. В странах СНГ также имеется опыт использования биосоляры [1; 2].

Основная часть. Биодизельные топлива, предназначенные для использования в дизельных двигателях, должны за минимальный период сформировать в камере сгорания топливно-воздушную смесь, обеспечивающую ее легкое воспламенение, плавное и достаточно полное сгорание с минимальным содержанием сажи, токсичных и канцерогенных веществ. Не допускается образование осадков в топливоподающей системе и нагароотложений на деталях двигателя [2–4].

Для достижения требуемого качества процесса смесеобразования топливо должно обладать заданным фракционным составом, который является одним из важнейших показателей эксплуатационных

свойств топлив для двигателей внутреннего сгорания. Фракционный состав характеризует содержание в топливе различных фракций, выкипающих в определенных температурных пределах.

При снятии характеристик фракционного состава для традиционного дизельного топлива обычно выделяют температуру начала перегонки (начало кипения), температуры перегонки 10, 50, 90% топлива и температуру окончания перегонки (конец кипения), соответствующую перегонке 96 или 98% топлива. Наличие в топливе большого количества легких фракций приводит к увеличению жесткости сгорания (скорости нарастания давления и максимального давления сгорания) и снижению ресурса работы дизельного двигателя.

Среднюю испаряемость топлива устанавливают по температуре выкипания 50%, которая обуславливает испаряемость топлива и период задержки воспламенения [4]. Наличие в топливе тяжелых трудно-испаряющихся фракций можно определить по температуре перегонки 90%. По температуре окончания перегонки, соответствующей перегонке 96 или 98% топлива, также выявляют присутствие в нем тяжелых (выкипающих при высоких температурах) фракций, чрезмерное содержание которых в топливе приводит к ухудшению испарения и усложнению образования однородной топливно-воздушной смеси, что увеличивает нагарообразование на деталях цилиндропоршневой группы и тем самым снижает экономичность и надежность работы двигателя.

Перечисленные выше факторы указывают на необходимость учитывать фракционный состав при выборе топлива для дизелей. Это также относится и к биодизельному топливу. Фракционный состав топлив определялся методом перегонки – путем разделения смеси жидкостей на компоненты, основанном на разности температур их кипения. Данный метод заключается в нагревании жидкости до кипения с последующей конденсацией паров в холодильнике. В настоящее время существуют способы и устройства автоматического определения фракционного состава топлив.

На рисунке 1 приведены кривые фракционной разгонки нефтяного дизельного топлива, растительного масла и их смесей различной концентрации.

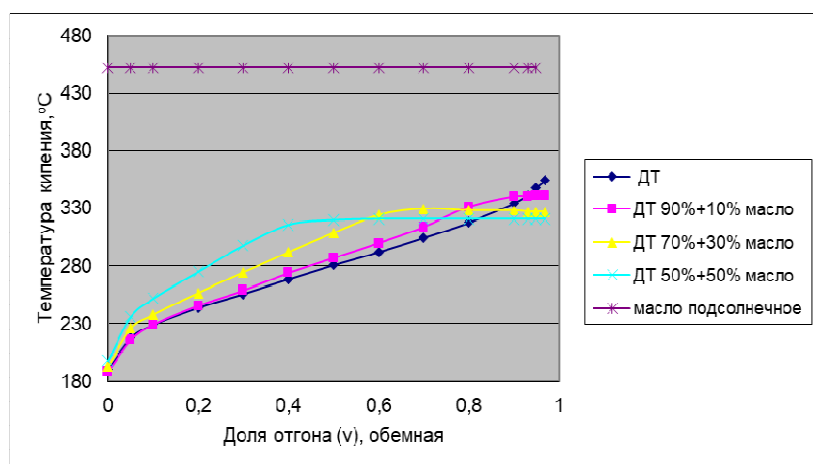


Рисунок 1. – Фракционный состав дизельного топлива, подсолнечного масла и их смесей

Температура кипения дизельного топлива находится в пределах от 180 до 350 °С. При повышении температуры выше $t = 310\text{--}330$ °С метиловые эфиры жирных кислот подвергаются термическому разложению. При содержании в дизтопливе растительного масла более 10% кривые разгонки образуют изотермические участки.

При перегонке биодизельного топлива отмечено термическое разложение его компонентов. Можно предположить, что оно происходит и при работе дизельного двигателя. Образующиеся продукты окисления и полимеризации являются причиной негативных процессов в двигателе – нагаро- и коксоотложения на деталях камеры сгорания. Температура выкипания 50% фракций для нефтяного ДТ в данном случае составляла 280 °С. Для всех биодизельных топлив эта температура намного выше – в интервале 300–330 °С.

Предлагается более детальный анализ влияния концентрации растительного масла на изменение температур контрольных точек кипения дизельного топлива. Нанесем на график (рисунок 2) зависимости разности температур кипения смесей дизельного топлива с подсолнечным маслом и чистого дизельного топлива разной концентрации подсолнечного масла по интервалу кипения (согласно ГОСТ 2177-99).

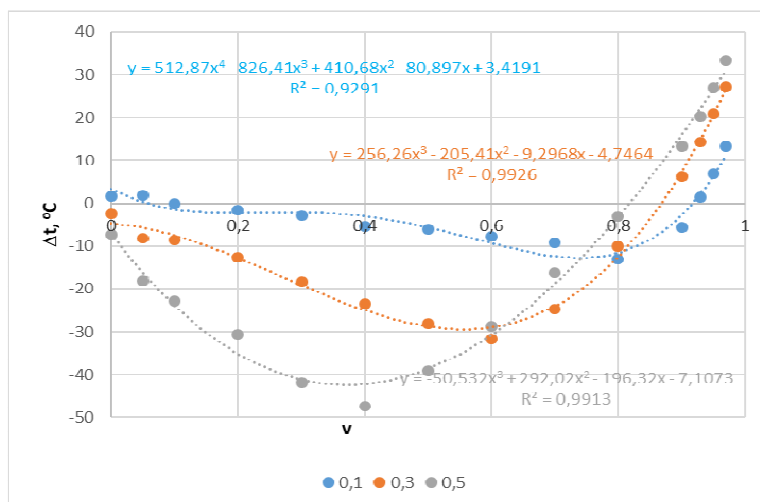


Рисунок 2. – График зависимости разности температур кипения в контрольных точках (по ГОСТ 2177-99) дизельного топлива и смесей дизельного топлива с подсолнечным маслом разной концентрации по интервалу кипения

Эти точки можно адекватно описать полиномами 3–4 степени. Введем обозначения величин:

$\Delta t = t_{ДТ} - t_{СМ}$ – разность температур кипения дизельного топлива (чистого) и смеси дизельного топлива с растительным маслом;

$v = \frac{V}{V_0}$ – объемная доля отгона нефтепродукта (по ГОСТ 2177-99);

ϕ – объемная доля растительного масла в дизельном топливе.

Рассмотрим зависимость разности температур кипения смесей дизельного топлива с подсолнечным маслом и чистого дизельного топлива от концентрации подсолнечного масла в дизельном топливе (рисунок 3). Кривые в интервале от начала кипения до 40%-й точки и от 93%-й точки до конца кипения имеют монотонный характер. Кривые в интервале 50%–90% имеют точки экстремума. Эти кривые можно представить полиномиальными уравнениями 3-й степени.

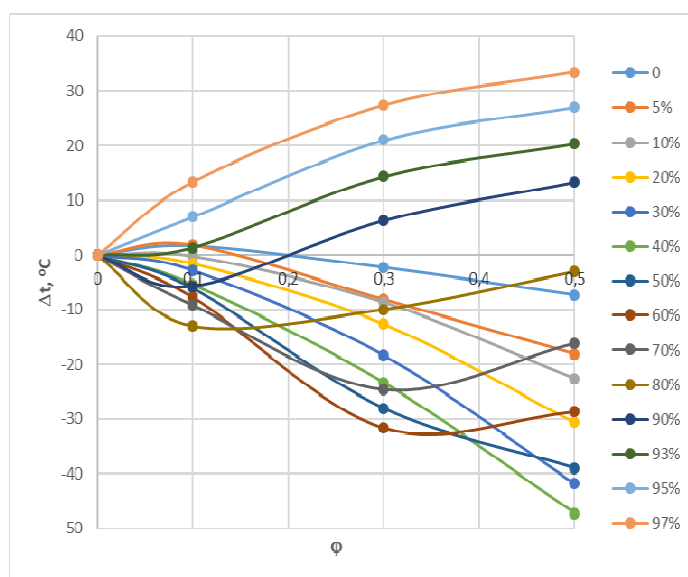


Рисунок 3. – График зависимости разности температур кипения дизельного топлива и смесей дизельного топлива с подсолнечным маслом от концентрации подсолнечного масла (цветные линии – контрольные точки кипения по ГОСТ 2177-99)

Графики на рисунках 2, 3 представляют собой проекции этой поверхности на координатные плоскости. Таким образом, можно представить зависимость разности температур кипения смесей дизельного топлива в виде поверхности 3-го порядка (рисунок 4). Уравнение поверхности 3-го порядка имеет вид

$$\Delta t = A_0 + A_1 \cdot \varphi + A_2 \cdot \varphi^2 + A_3 \cdot \varphi^3 + A_4 \cdot \nu + A_5 \cdot \nu^2 + A_6 \cdot \nu^3 + A_7 \cdot \nu^4 + A_8 \cdot \varphi \cdot \nu + A_9 \cdot \varphi \cdot \nu^2 + A_{10} \cdot \varphi^2 \cdot \nu + A_{11} \cdot \varphi^2 \cdot \nu^2.$$

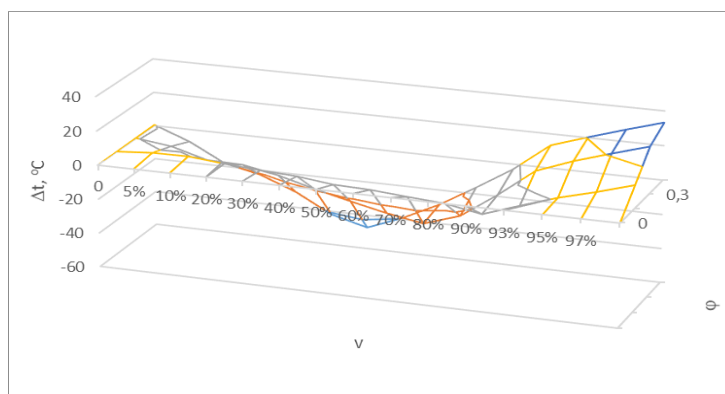


Рисунок 4. – Разность температур кипения смесей дизельного топлива в зависимости от контрольной точки кипения и доли подсолнечного масла в дизельном топливе

Обработав массив экспериментальных данных получили значения коэффициентов в приведенном выше уравнении со средним квадратичным отклонением 3 °С. Проведем оценку значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии. После оценки значимости был сделан вывод, что некоторые переменные оказывают незначительное влияние на результаты расчета, поэтому их количество можно сократить.

В результате получим новое уравнение регрессии и произведем уточненный расчет коэффициентов, со средним квадратичным отклонением 3 °С, т.е. значение среднего квадратичного отклонения осталось прежним.

$$\Delta t = 42, 2\varphi - 127\varphi^2 + 20, 1\nu - 128\nu^3 + 112\nu^4 - 669\varphi \cdot \nu + 720\varphi \cdot \nu^2 + 668\varphi^2 \cdot \nu - 562\varphi^2 \cdot \nu^2.$$

Таким образом, можно считать данный вид уравнения приемлемым для дальнейших расчетов. Данное уравнение позволяет определить изменение температуры кипения дизельного топлива в различных точках по ГОСТ 2177-99 в зависимости от количества добавленного растительного масла. Это актуально, т.к. каждая контрольная точка дизельного топлива, как отмечалось выше, влияет на его эксплуатационные показатели.

Заключение. Приведенные данные экспериментальных исследований подтверждают возможность использования в дизелях биодизельных топлив. Наибольшее приближение к свойствам нефтяных дизельных топлив обеспечивает применение смесей нефтяного дизельного топлива и эфиров растительных масел. При этом удается получать показатели токсичности отработавших газов, которые заметно лучше аналогичных показателей дизеля, работающего на чистом дизельном топливе. Причем улучшения этих показателей достигается даже при небольшом содержании биодизельного топлива в смеси (5–10%). Это позволяет использовать исследованные биодизельные топлива в качестве экологических добавок к нефтяному дизельному топливу. Получено выражение для определения вероятного изменения температуры кипения дизельного топлив при добавлении к нему подсолнечного масла, что дает возможность быстро оценить изменение фракционного состава, не прибегая к эксперименту, тем более, что автоматический анализ азеотропных смесей затруднителен – в изотермической области может произойти бурное вскипание, выброс парожидкостной смеси в конденсатор-холодильник и аварийное автоматическое отключение анализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Использование биотоплив на основе растительных масел в дизельных двигателях / В.А. Марков [и др.] // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – С. 74–81.

2. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков [и др.]. – М. : Инженер, 2011. – 536 с.
3. Зачем нужны биотоплива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://old.computerra.ru/features/315122/>. – Дата доступа: 14.06.2020.
4. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справ. / ред. В.М. Школьников. – М. : Техноинформ, 1999. – С. 13–94.

Поступила 10.06.2020

STUDY OF FRACTIONAL COMPOSITION BIO DIESEL FUELS AND THEIR MIXTURES

A. SPIRIDONOV, Ye. SAFRONOVA, T. RUDINSKAYA

The relevance of the work lies in the fact that recently in the world the production of biofuels and biofuel additives in existing fuels has been increasing, in particular vegetable oil in diesel fuel. As a rule, this is associated with a number of difficulties in analyzing the quality of fuel mixtures, since they form an azeotropic mixture. The features of the distillation of azeotropic mixtures of diesel fuel with vegetable oil are studied. To determine the dependences of the boiling point on the concentration, mixtures of diesel fuel and vegetable oil of various concentrations were taken and their fractional distillation was carried out using standard AD86 5G distillation and PMD-100 microdistillation devices. The effectiveness of the application and properties of biodiesel fuel compositions were studied. The fractional composition of these fuels is presented. The main characteristics and world experience of using vegetable oil waste are given.

Keywords: *biodiesel fuel, fractional composition, boiling.*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Методика использования современной парадигмы познания металлорежущих станков в научно-технической экспертизе изобретений	2
<i>Попок Н.Н., Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е., Латушкин Д.Г.</i> Практическое приложение теории базирования для синтеза универсально-сборных приспособлений	11
<i>Пилипенко С.В.</i> Анализ влияния параметров калибровки ручья калибра стана холодной прокатки труб на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации	22
<i>Попок Н.Н., Портянко С.А.</i> Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D прототипирования	29
<i>Дудан А.В., Лопата В.Н., Калинин В.И., Лопата А.В., Ивченко Т.И., Грищенко А.П.</i> Использование рабочих органов с дискретными покрытиями для повышения эффективности дробления зерна	40
<i>Дудан А.В., Рутковский А.В., Агеев М.С., Мирненко В.И., Смирнова Т.В., Радько О.В.</i> Повышение прочностных свойств поверхностей стальных деталей вакуумным термоциклическим азотированием в плазме пульсирующего тлеющего разряда	45
<i>Данилов В.А., Селицкий А.Н.</i> Износ и стойкость инструмента при ротационном точении синусоидальных профильных поверхностей	55

ТРАНСПОРТ

<i>Аземша С.А., Грищенко Т.В., Ясинская О.О.</i> Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров в г. Могилеве	62
<i>Аземша С.А., Капский Д.В.</i> Статистическое исследование окупаемости работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения	70
<i>Иванов В.П.</i> Повышение качества подготовки специалистов по технической эксплуатации автомобилей совершенствованием курса «Проектирование предприятий автомобильного транспорта»	78
<i>Капский Д.В., Головнич А.К., Вигерина Т.В., Кузьменко В.Н., Красильникова А.С., Горелик Е.Н., Семченков С.С., Кот Е.Н.</i> Развитие городского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке	85
<i>Капский Д.В., Иванов В.П., Головнич А.К., Кузьменко В.Н., Красильникова А.С., Горелик Е.Н., Семченков С.С., Кот Е.Н.</i> Оценка состояния транспортной системы городов Полоцка и Новополоцка	98
<i>Кострицкий В.В., Шевченко Д.С., Павченко А.В.</i> Сокращение трудоемкости диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания при помощи программ-анализаторов	103

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Спириденко Л.М., Янушонок А.Н., Богданович Н.А.</i> Определение условий работы соединительных поясов при установке балластирующих элементов на нефтепроводе под углом в 30°	110
<i>Айюб Зейн Алабдин, Ермак А.А., Юсевич А.И.</i> Влияние свойств компонентов сырья на выход и качество продуктов процесса замедленного коксования нефтяных остатков (обзор)	115
<i>Спириденов А.В., Сафронова Е.В., Рудинская Т.А.</i> Исследование фракционного состава биодизельных топлив и их смесей	123