

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

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

№ 1(49), 2024

---

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 машиноведения и машиностроения, транспорта и химических технологий.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

---

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

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in machine science and mechanical engineering, transport and chemical engineering.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.  
Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/industry>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск *В.П. Иванов.*  
Редактор *Т.А. Дарьянова.*

Подписано к печати 05.03.2024. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 17,94. Тираж 50 экз. Заказ 77.

**МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 658.512

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-2-10

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
АДДИТИВНОГО И СУБТРАКТИВНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ  
ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

**д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК**  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)  
**канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ**  
(Витебский государственный технологический университет)

На основе анализа характеристик современных средств измерений, функционирования автоматизированных систем метрологического оснащения и проектирования технологических процессов предложено методическое, алгоритмическое и программное обеспечение процедур выбора средств измерения геометрических величин деталей сложной формы для технологической подготовки аддитивного и субтрактивного машиностроительных производств. Система учитывает вид величины, метрологические характеристики средств измерения, условия измерения и особенности применения, связанные с геометрией поверхностей, технологией их формообразования, доступностью и расположением. Кроме того, она позволяет снизить трудоемкость проектных работ и повысить уровень качества технологических решений. Может использоваться в проектных бюро машиностроительных предприятий; IT-компаниях для создания и совершенствования автоматизированных систем; образовательном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе аддитивных и субтрактивных технологий.

**Ключевые слова:** средство измерения, система автоматизированного проектирования, геометрическая величина, линейный размер, взаимное расположение, классификация, база данных, метрологические характеристики, подготовка производства, машиностроение.

**Введение.** Современное машиностроительное производство развивается в условиях эпохи четвертой индустриальной революции, характеризующейся кастомизацией продукции и повышением требований к ее качеству. Принципиальное значение при этом играет развитие аддитивных и субтрактивных технологий изготовления машиностроительных изделий. Измерения в современных аддитивных и субтрактивных производственных процессах машиностроения являются источником объективной информации и играют важнейшую роль в управлении качеством продукции. Инженеры-машиностроители в практической работе при проектировании технологических процессов регулярно решают задачи выбора средств измерений геометрических величин.

Для деталей сложной формы, изготавливаемых с помощью аддитивных и субтрактивных технологий, характерным и частым является задание высоких значений точности различных геометрических величин. Особое внимание при этом уделяется точности линейных размеров и допусков взаимного расположения, трудоемкость измерения которых составляет порядка 80% от времени измерения всех геометрических величин. Для межоперационного и окончательного их контроля все более широкое применение находят бесконтактные индуктивные и оптоэлектронные системы (лазерные трекеры, интерферометры, триангуляционные датчики, голографические системы и др.), а также системы датчиков и щупов.

Автоматизация проектных работ, связанных с выбором средств измерения геометрических величин при разработке технологических процессов в машиностроении, может позволить: повысить производительность труда технолога и, как следствие, сократить сроки технологической подготовки производства; повысить уровень качества технологических решений (за счет снижения вероятности ошибок, унификации и типизации).

Анализ работ по автоматизации выбора средств измерения в машиностроении показывает, что в проектной практике находят применение автоматизированные системы метрологического оснащения производства, а также системы автоматизированного проектирования технологических процессов.

Автоматизированные системы метрологического оснащения производства (АИС «Метрконтроль» (ООО «Новософт Развитие», Новосибирск)<sup>1</sup>, АИС «Метрология» (АО НПП «КПЗ Тайфун», Калуга)<sup>2</sup>, САМС (ООО «АльтСофт», Москва)<sup>3</sup>, Global-TLS (ООО «БизнесТехнологии», Санкт-Петербург) и др.) используются для ведения метрологического учета состояния и применения в подразделениях предприятия средств измерений; формирования информации о сроках пригодности средств измерения к применению; использования и анализа информации о применяемых средствах измерения, включая их технические характеристики, методики поверки, сведения об эксплуатационной надежности и др.

<sup>1</sup> URL: <https://www.novosoft.ru/nerpa/asomi/metrology-articles/ais-metrokontrol>

<sup>2</sup> URL: <https://typhoon-jsc.ru/index.php/production-and-services/engineering/software/metrology>

<sup>3</sup> URL: <http://www.altsoft.ru/custom-solution/156-sistema-avtomatizatsii-metrologicheskikh-sluzhb?limitstart=&showall=1>

С помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов формируется комплект технологической документации (операционные, маршрутно-операционные карты, карты контроля и др.), в котором отражены необходимые для реализации технологии средства измерения. Наибольшее распространение на машиностроительных предприятиях получили такие системы автоматизированного проектирования технологических процессов, как ВЕРТИКАЛЬ (АО «Аскон», Санкт-Петербург)<sup>4</sup>, ADEM CAPP (ООО «АДЕМ-инжиниринг», Москва)<sup>5</sup>, КТД вWindchill с модулем CtrlCard (ООО «ПРО Текнолоджиз», Москва)<sup>6</sup>, T-FLEX Технология (ЗАО «ТОП Системы», Москва), ТЕСНСАRD (ОДО «Интермех», Минск), SWR-технология (SWR, Москва), СПРУТ ТП (ООО «СПРУТ технология», Набережные Челны), Technologi CS (ГК CSoft, Москва), ТехноПро (КРВТ «Вектор-Альянс», Москва), ПРАМЕНЬ (УП «Институт Белоргстанкинпром», Минск) и др.

При выборе средств измерения геометрических величин с помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов пользователю предлагаются интерфейсы со списком различных универсальных средств измерения, упорядоченных, как правило, по принципу действия. Далее выбор средств измерения осуществляется исходя из опыта и интуиции проектировщика на основе анализа точности измеряемых параметров, возможностей средства измерения, его диапазона измерения и единиц деления шкал. В ряде систем предусматриваются «фильтры» для универсальных средств измерения по виду размера, диапазону и пределу измерения (рисунок 1).

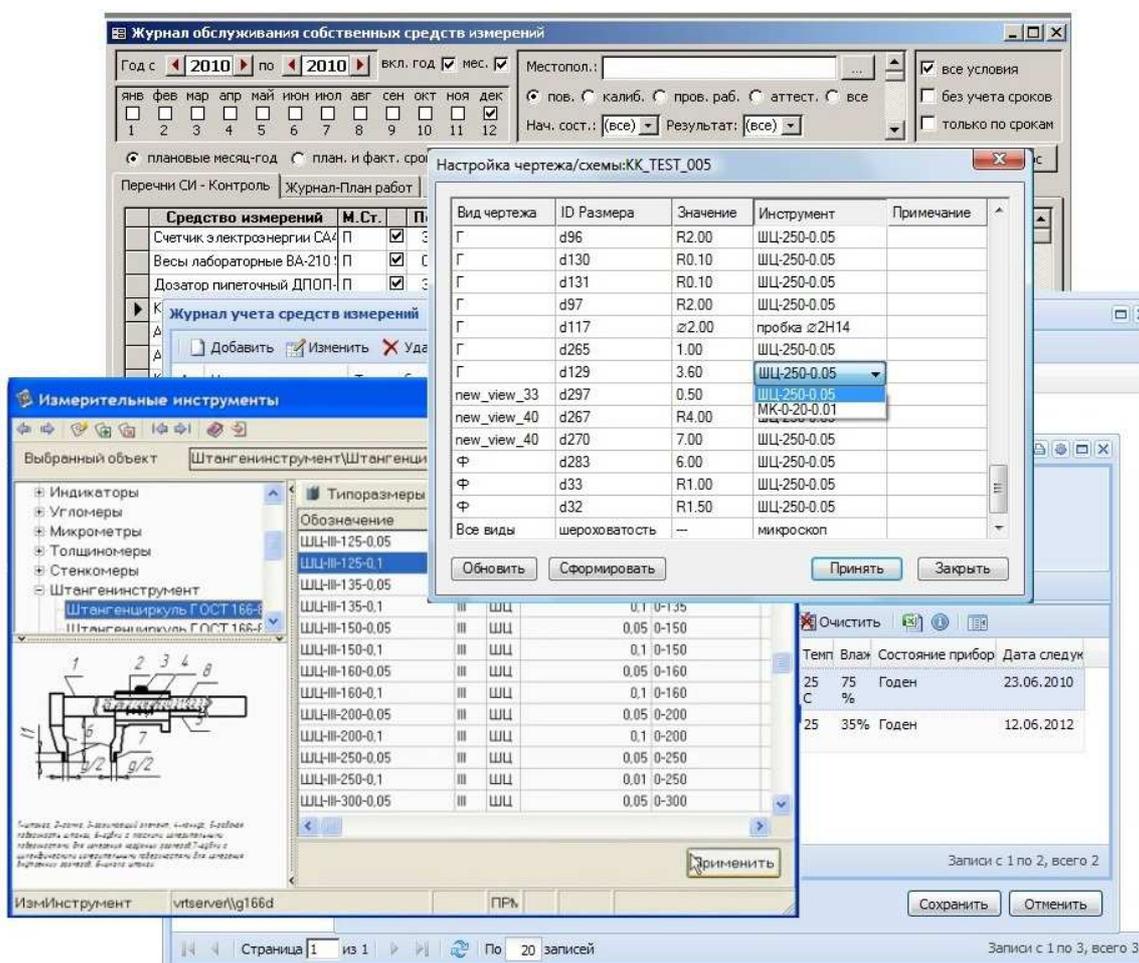


Рисунок 1. – Некоторые интерфейсы Метрконтроль, САМС, ВЕРТИКАЛЬ и CtrlCard

Основой выбора универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм, а также величин радиального и торцового биений являются рекомендации, изложенные в ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86. В работе [1] справедливо указывается на ряд очевидных недостатков этих документов: ограничен список средств измерений; не совпадают диапазоны номинальных размеров при нормировании точности с типоразмерами средств

<sup>4</sup> URL: <https://ascon.ru/products/420/review/>

<sup>5</sup> URL: <https://adem.ru/products/capp/>

<sup>6</sup> URL: <https://pro-technologies.ru/product/creo-and-windchill/karta-kontrolya>

измерений; не учитывается специфика измеряемой поверхности; оптимальность выбора одного средства измерения из нескольких рекомендованных.

Однако методики и системы автоматизированного выбора средств измерения, учитывающие вид геометрической величины, метрологические характеристики средств измерения, условия измерения, особенности применения (связанные с видом технологии образования поверхностей, доступностью и их расположением) не получили развития. Их создание требует соответствующего анализа и классификации методов и средств измерений, а также формализации и алгоритмизации процессов их хранения (в базах данных) и выбора.

Таким образом, *целью работы* является создание методического, алгоритмического и программного обеспечения системы автоматизированного выбора средств измерений геометрических величин в современном многоменклатурном аддитивном и субтрактивном машиностроительном производствах деталей сложной формы.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи: проведен анализ признаков классификации и классификаторов средств измерения геометрических величин; разработано методическое обеспечение процедур выбора средств измерения различных геометрических величин; разработан алгоритм функционирования и общая структура программного обеспечения по выбору средств их измерения; определена конфигурация технических средств; разработано программное обеспечение, проведены его комплексная отладка и предварительные испытания; разработаны программные документы; проведена опытная эксплуатация системы. При этом использовались методы теоретической метрологии, теорий средств измерений, автоматизации проектирования, системно-структурного анализа и моделирования.

Результаты исследований. Анализ информационных источников, а также опыта работы машиностроительных предприятий показывает, что средства измерений классифицируются по различным признакам. Причем эти признаки, как правило, взаимно независимы и в средстве измерений могут находиться в различных сочетаниях.

К числу признаков классификации средств измерения геометрических величин относятся: вид измеряемых величин; принцип действия; назначение; число проверяемых параметров при одной установке объекта измерения; способ образования показаний; способ получения числового значения измеряемой величины; точность; условия применения; степень защищенности от внешних магнитных и электрических полей; прочность и устойчивость против механических воздействий и перегрузок; стабильность; чувствительность; пределы и диапазоны измерений; роль, выполняемая в системе обеспечения единства измерений; уровень автоматизации; уровень стандартизации; отношение к измеряемой величине.

За основу выбора методов и средств измерения геометрических величин предлагается принять их классификацию по виду. Установлено, что по этому признаку все методы и средства измерения необходимо разделить по виду изменения определяемых величин параметров как поверхностей, так и конструктивных элементов изделий: линейных размеров и взаимного расположения; формы; углов; конусов; резьб; шероховатости и волнистости; зубчатых колес; шпоночных соединений; шлицевых соединений; больших длин и диаметров; толщин покрытий и т.п.

Анализ справочников, сайтов фирм-производителей средств измерения, различных каталогов, а также реестра средств измерения показывает, что к основным средствам измерения линейных размеров относятся: меры длины концевые плоскопараллельные; меры длины штриховые; щупы; калибры; штангенинструменты (штангенциркули, штангенглубиномеры и штангенрейсмасы); микрометрические инструменты (гладкий микрометр, нутромер, глубиномер); рычажно-механические приборы (индикаторы часового типа, измерительные головки с рычажно-зубчатой передачей, головки высокой точности, микрометры рычажные и др.); оптико-механические и оптические приборы (оптиметры, длинномеры оптические, измерительные машины, измерительные микроскопы, проекционные приборы, катетометры, сферометры и др.); пневматические, электромеханические, электрические и радиационные приборы.

Для хранения данных о метрологических характеристиках средств измерения линейных размеров и условиях их применения предлагается использовать общий формат данных, представленный в таблице 1. Конкретный случай применения предусматривает учет геометрии стандартных типовых конструктивных элементов (КЭ), типов размеров (охватывающий, охватываемый, нейтральный), а также видов поверхностей (ось и плоскость).

Таблица 1. – Формат представления данных о методах и средствах измерения линейных размеров

Средство измерения	Коэффициент сложности	Случай применения	Вариант использования	Условия измерения				Диапазон измерения				
				УИ <sub>1</sub>	УИ <sub>2</sub>	...	УИ <sub>m</sub>	Д <sub>1</sub>	Д <sub>2</sub>	...	Д <sub>r</sub>	
СИ <sub>1</sub>	Сл1	СП <sub>11</sub>	ВИ <sub>11</sub>									
			...									
			ВИ <sub>1p</sub>									
		...	...									
...	...	СП <sub>1k</sub>	...									
...	...	...	...									
СИ <sub>n</sub>	СЛ <sub>n</sub>	...	...									

Как было отмечено выше, принципиальную роль в алгоритмах по выбору средств измерений линейных размеров и допусков взаимного расположения играет ввод исходных данных. Согласно предлагаемому алгоритму выбора средств измерения линейных размеров (рисунок 2) ввод исходных данных предусматривает зада-

ние типа размера (охватывающий, охватываемый, нейтральный), а также класса, подкласса, вида и типа поверхности(ей), которую(ые) ориентирует рассматриваемый размер. В том случае, если задается нейтральный размер, то необходимо ввести виды поверхностей, которые ориентируют размер. Предусматривается отображение поверхностей и размеров, их ориентирующих. Далее необходимо ввести номинальное значение размера, допуск, вариант использования и условия измерений. Вариантами использования могут быть: в руках, на стойке, прочих приспособлениях и др. Условиями измерения являются: температурный режим, установочный узел и т.д. Диапазон, условия измерений и соответствующие погрешности задаются в режиме администратора по паспортным данным средства измерения.

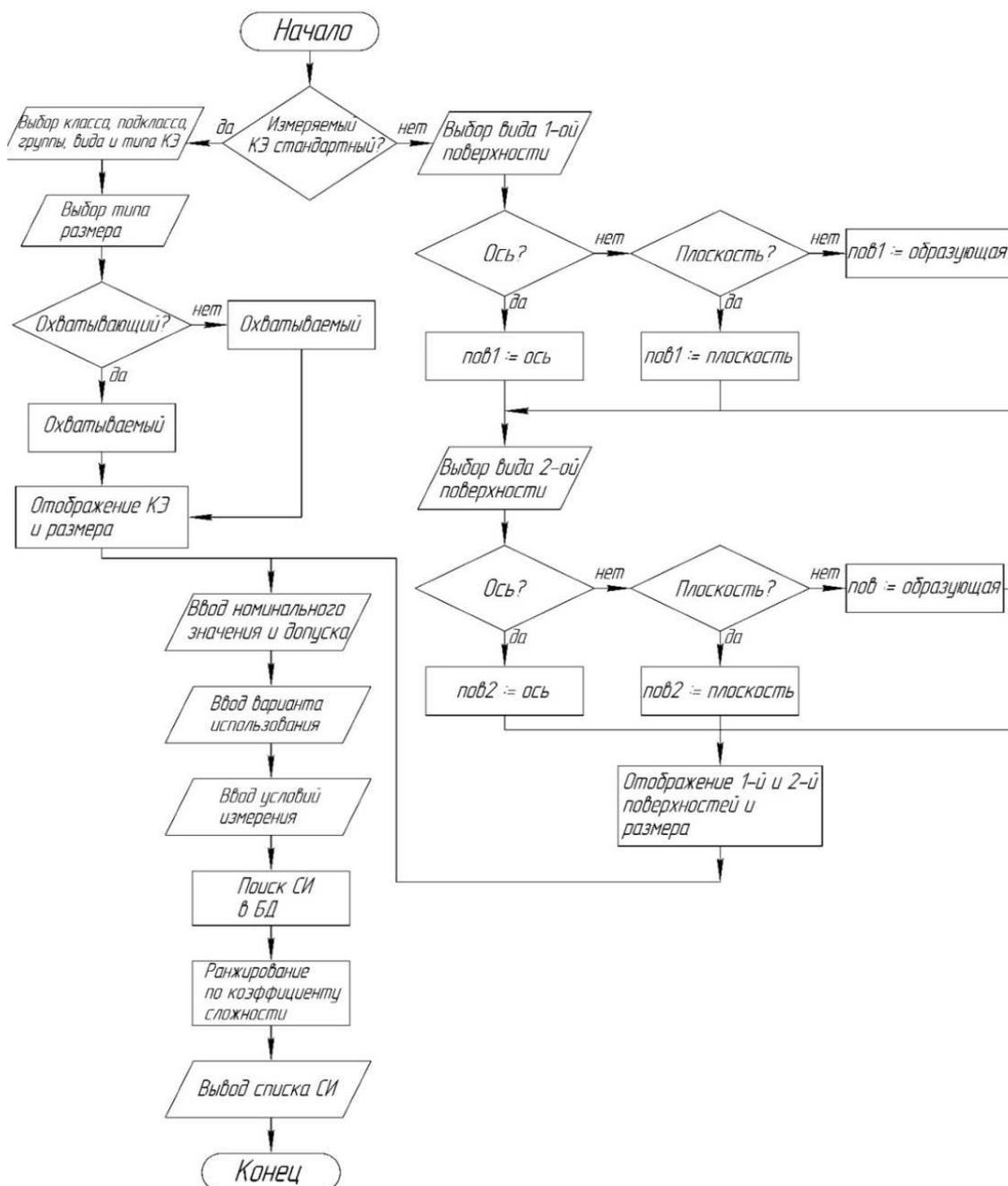


Рисунок 2. – Алгоритм выбора средств измерений линейных размеров

Согласно предлагаемому алгоритму выбора средств измерения допусков взаимного расположения (рисунок 3) ввод исходных данных предусматривает задание вида допуска (перпендикулярность, параллельность, наклон, симметричность, соосность, пересечение осей, позиционный допуск), вида поверхности (ось или плоскость). Для удобства ввода предусматривается отображение поверхностей и допусков. Далее необходимо ввести номинальное значение допуска.

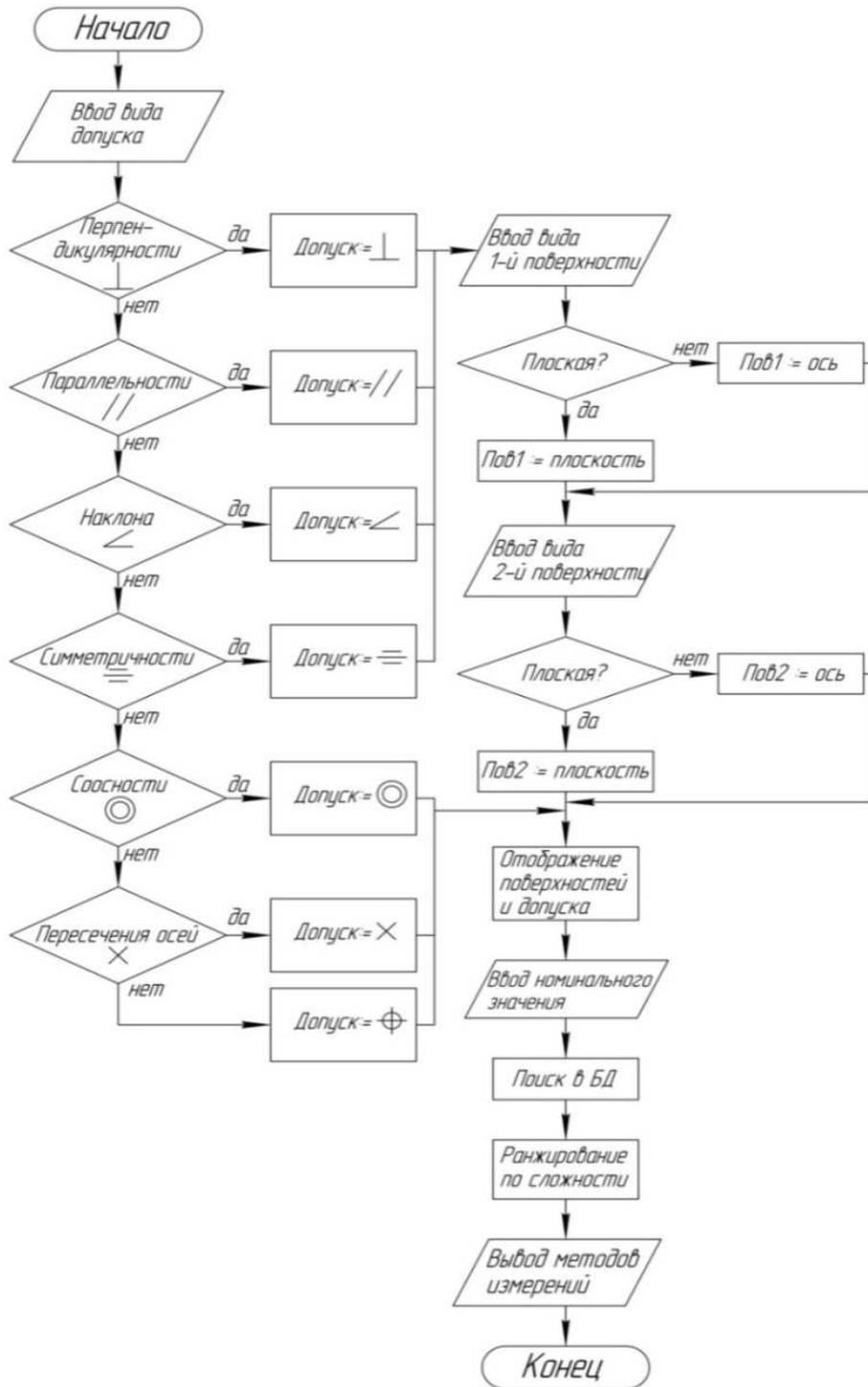


Рисунок 3. – Алгоритм выбора средств измерения допусков взаимного расположения

Средства измерения допусков взаимного расположения предлагается классифицировать по следующим признакам: вид допуска (параллельность, перпендикулярность, соосность, симметричность, наклон, пересечение осей, биение); вид конструктивного элемента (ось, плоскость); применяемые приборы (индикаторы, щупы, микрометры и др.).

Аналогичные исследования проведены по всем указанным выше геометрическим величинам.

Для хранения информации о средствах измерения с помощью системы управления базами данных «Microsoft Access 2015» организован ряд баз данных, создан массив соответствующих таблиц («Conn\_non\_typical\_pov», «Conn\_tool\_dop\_param», «Conn\_vidrov\_podklass», «Dop\_param», «Klass\_pov», «Pictures\_variants», «Podklass\_pov», «Pogr\_izm\_LIN», «Pred\_pogr», «Range», «Tools», «Type\_izm», «Type\_pov», «Vid\_pov», «Vid\_razmer» и т.д.), а также определена структура полей (рисунки 4 и 5, таблица 2).

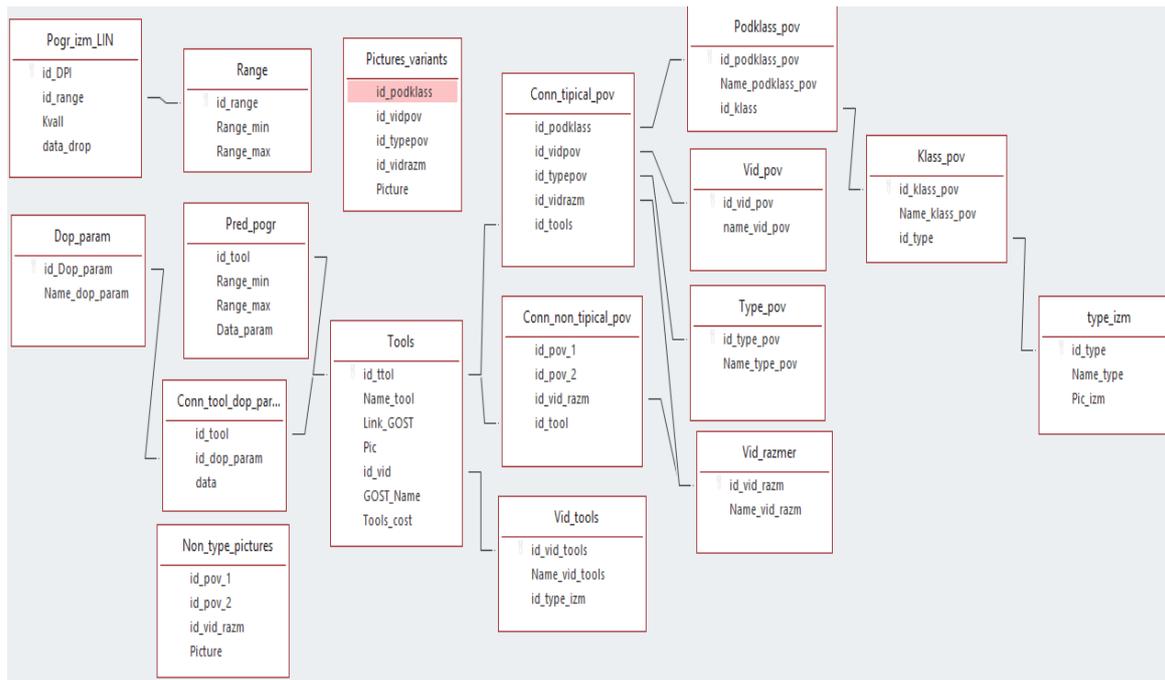


Рисунок 4. – Структура базы данных для выбора средств измерения линейных размеров

Имя поля	Тип данных
id_tool	Числовой
id_dop_param	Числовой
data	Длинный текст

Имя поля	Тип данных
id_Dop_param	Счетчик
Name_dop_param	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_DPI	Счетчик
id_range	Числовой
Kvall	Числовой
data_drop	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_tool	Числовой
Range_min	Числовой
Range_max	Числовой
Data_param	Короткий текст

Имя поля	Тип данных
id_range	Счетчик
Range_min	Числовой
Range_max	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_podklass	Числовой
id_vidpov	Числовой
id_typepov	Числовой
id_vidrazm	Числовой
Picture	Поле объекта OLE

Имя поля	Тип данных
id_podklass_pov	Счетчик
Name_podklass_pov	Короткий текст
id_klass	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_podklass	Числовой
id_vidpov	Числовой
id_typepov	Числовой
id_vidrazm	Числовой
id_tools	Числовой

Имя поля	Тип данных
id_type	Счетчик
Name_type	Короткий текст
Pic_izm	Поле объекта OLE

Имя поля	Тип данных
id_vid_pov	Счетчик
name_vid_pov	Короткий текст

Рисунок 5. – Элементы массива таблиц и полей базы данных выбора средств метрологического оснащения измерений линейных размеров

Так, например, таблица «Conn\_non\_tirical\_pov» содержит информацию о средствах измерения нестандартных конструктивных элементов. Поля, их типы и назначение представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Структура полей таблицы «Conn\_non\_tirical\_pov»

Имя поля	Тип данных	Поле		Описание
		свойство	значение	
id_pov_1	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Non_tirical_vid_pov»
id_pov_2	Числовой	Размер поля Обязательное поле Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Non_tirical_vid_pov»
id_vid_razm	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Vid_razmer»
id_tool	Числовой	Размер поля Новые значения Индекс	Длинное целое Нет Нет	Внешний ключ для связи с таблицей «Tools»

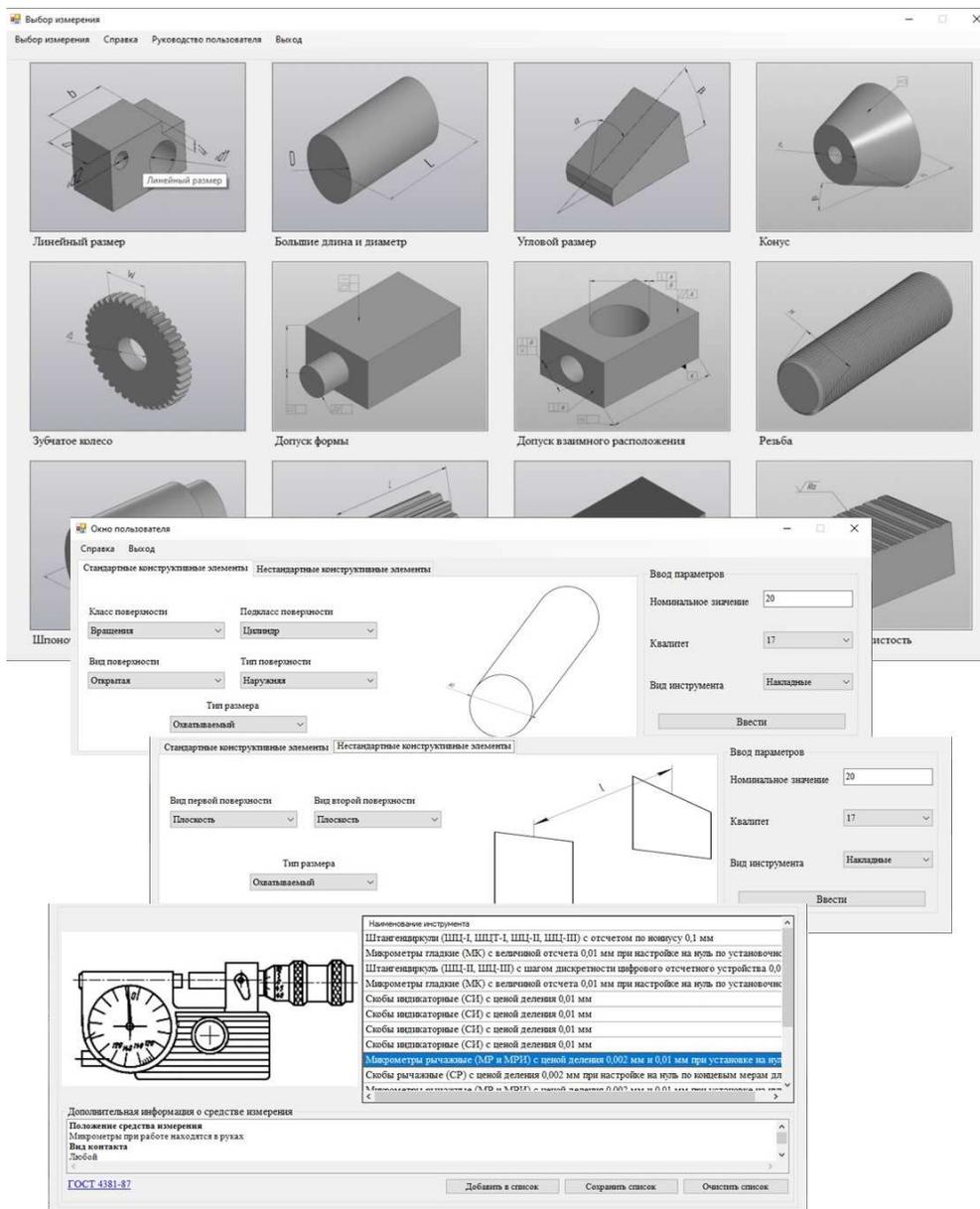


Рисунок 6. – Элементы исходного интерфейса, интерфейсов ввода исходных параметров линейных размеров и работы с wybranными средствами измерений

Структурно программное обеспечение представляет собой реляционные базы данных и саму программу, предназначенную для обработки и выдачи информации на основе заданных параметров. Программное обеспечение разработано на языке C# в виртуальной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием стандартных элементов и математических функций. Функционирование программного обеспечения основано на обработке программой информации, введенной пользователем, формированием запроса к встроенной базе данных с помощью декларативного языка программирования SQL и выводом информации из базы на экран пользователя.

Исходное окно программы представляет собой набор интерактивных закладок, соответствующих наименованиям измеряемых величин (см. рисунок 6). После активации нужной закладки пользователю предлагается ввести ряд исходных информативных параметров. Так, для выбора средств метрологического оснащения измерений линейных размеров ввод исходных данных предусматривает задание типа размера, геометрии поверхностей, номинального значения размера, допуска, варианта использования и условий измерений. Предусматривается отображение поверхностей и размеров их ориентирующих. Диапазон, условия измерений и соответствующие погрешности задаются в режиме администратора по паспортным данным средства измерения. Работой алгоритмов предусматривается поиск в базах данных средств измерения по заданным параметрам ввода, их ранжирование и вывод по возрастанию коэффициента сложности.

**Заключение.** В ходе исследований проведен анализ характеристик современных средств измерений геометрических величин, а также функционирования автоматизированных систем метрологического оснащения и проектирования технологических процессов в аддитивном и субтрактивном машиностроительных производствах, который за счет классификации методов и средств измерений по различным признакам, выявления метрологических характеристик и условий применения создал возможность для формализации и алгоритмизации процессов их хранения (в базах данных) и выбора.

На основе анализа предложено методическое и алгоритмическое обеспечение процедур выбора средств измерения геометрических величин деталей сложной формы для технологической подготовки аддитивного и субтрактивного машиностроительных производств. Предложены принципиальные алгоритмы работы системы в целом, модели соответствующих подсистем (линейные размеры, взаимное расположение, форма, углы, конусы, резьбы, шероховатости и волнистости, зубчатые колеса, шпоночные соединения, шлицевые соединения, большие длины и диаметры, толщины покрытий), а также определена структура входных и выходных данных, предложены модели структур, таблиц и полей баз данных. Особенностью разработанного методического и алгоритмического обеспечения является учет видов геометрических величины, метрологических характеристик средств измерения, условий измерения и особенностей применения, связанных с видом технологии образования поверхностей, доступностью и расположением.

Представление разработанного методического и алгоритмического обеспечения на языке теории графов, алгебры логики, теории множеств позволило создать программное обеспечение системы автоматизированного выбора средств измерений геометрических величин изделий сложной формы в многоменклатурном аддитивном и субтрактивном машиностроительном производстве позволяющее снизить трудоемкость проектных работ и повысить уровень качества технологических решений. Проведены предварительные испытания и опытная эксплуатация системы в учебном процессе, что доказало работоспособность методик и алгоритмов.

Разработки могут использоваться в проектных бюро машиностроительных предприятий при разработке технологических процессов аддитивных и субтрактивных производств; в организациях специализирующихся на разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов и автоматизированных систем метрологического оснащения производства для совершенствования подсистем выбора средств измерений; в учебном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения и производства изделий на основе трехмерных технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глубоков А.В., Ястребов Т.С. Проблемы автоматизации выбора универсальных средств измерения линейных размеров / А. В. Глубоков, Т. С. Ястребов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4(26). – С. 37–42. DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-6

#### REFERENCES

1. Glubokov, A.V. & Yastrebov, T.S. (2018). Problemy avtomatizatsii vybora universal'nykh sredstv izmereniya lineinykh razmerov [Problems of automation of the selection of universal measuring instruments of linear dimensions]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 4(26), 37-42. DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-6 (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 21.11.2023

**AUTOMATED SELECTION SYSTEM FOR MEASURING GEOMETRIC VALUES  
FOR TECHNOLOGICAL PREPARATION OF ADDITIVE AND SUBTRACTIVE  
ENGINEERING INDUSTRIES DETAILS OF COMPLEX SHAPE**

**N. ПОРОК**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

**N. BELYAKOV**

*(Vitebsk State Technological University)*

*Based on the analysis of the characteristics of modern measuring instruments, the functioning of automated systems of metrological equipment and the design of technological processes, methodological, algorithmic and software procedures for the selection of measuring instruments of geometric quantities of parts of complex shape for the technological preparation of additive and subtractive machine-building industries are proposed, taking into account the type of magnitude, metrological characteristics of measuring instruments, measurement conditions and application features related to the geometry of surfaces, the technology of their form formation, accessibility and location, which allows to reduce the complexity of design work and improve the quality of technological solutions. The system can be used in design bureaus of machine-building enterprises; IT companies for the creation and improvement of automated systems; educational process for the training of specialists in the production of products based on additive and subtractive technologies.*

**Keywords:** *measuring instrument, computer-aided design system, geometric magnitude, linear size, relative position, classification, database, metrological characteristics, production preparation, mechanical engineering.*

УДК 629.114

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-11-17

## ДИНАМИКА ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА С АНТИБЛОКИРОВОЧНОЙ СИСТЕМОЙ АВТОМОБИЛЯ ОСОБО БОЛЬШОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

*С.В. ЕРМИЛОВ, канд. техн. наук, доц. М.И. ЖИЛЕВИЧ, д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Проанализированы результаты многовариантного расчета динамики тормозного гидравлического привода с антиблокировочной системой автомобиля особо большой грузоподъемности. Приведены условия проведения дорожных испытаний такого автомобиля с установленной на нем антиблокировочной системой и рассмотрены результаты экспериментальных исследований. Дана оценка влияния принятых допущений на поведение некоторых параметров тормозного гидравлического привода с антиблокировочной системой путем сравнения итоговых характеристик, полученных в ходе аналитических и экспериментальных исследований, позволяющих определить адекватность математической модели.*

**Ключевые слова:** антиблокировочная система, гидравлический тормозной привод, автомобиль особо большой грузоподъемности, динамика гидравлического привода.

**Введение.** Успешное решение поставленных задач для ряда отраслей промышленности во многом зависит от темпов развития автомобильного транспорта, что приводит к постоянному совершенствованию тягово-динамических качеств автомобилей. Увеличение производительности автомобильного транспорта возможно только в том случае, если параллельно будет решаться проблема активной безопасности движения. Безопасность эксплуатации автомобилей при продолжающемся росте их численности, грузоподъемности и скорости движения в значительной степени определяется эффективностью действия и безотказностью тормозов.

Тормозная система должна обеспечивать минимальный тормозной путь, устойчивое замедление и в полной мере использовать технические возможности автомобиля, позволяющие максимально повысить его производительность. Кроме того, большое значение имеет и социально-экономический эффект, который оценивается уменьшением дорожно-транспортных происшествий.

Особого внимания заслуживает применение тормозных антиблокировочных систем (АБС) и их агрегатов, частично реализованных и внедряемых на некоторых марках автомобилей особо большой грузоподъемности (карьерных самосвалах) в виде дополнительной опции.

**Цель и постановка задачи.** В настоящее время АБС является обязательной конструктивной частью практически всех видов автотранспортных средств. Исключение – автомобили особо большой грузоподъемности, где установка таких систем не регламентирована<sup>1</sup>. Однако применение АБС на автомобилях малой и средней грузоподъемности показывает существенное повышение устойчивости и управляемости при торможении транспортного средства на различных поверхностях.

Внедрению любой системы в эксплуатацию предшествует длительный этап экспериментальных исследований, что зачастую сопряжено с существенными финансовыми затратами, которые могут быть сокращены применением математического моделирования, позволяющего изучить поведение различных выходных параметров в зависимости от изменения размеров элементов системы. Например, в тормозных приводах с АБС такими параметрами могут быть давления в узловых точках, перемещения поршней исполнительных гидроцилиндров и т.д. Однако математическое моделирование сопряжено с принятием определенных допущений [1–3], что не дает возможность исключить натурный эксперимент, позволяющий оценить степень адекватности полученной математической модели.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ влияния параметров гидравлического тормозного привода и модулятора АБС для автомобилей особо большой грузоподъемности на динамические характеристики и устойчивость работы такого привода.

2. Оценить степень влияния допущений, принятых в ходе вывода математической модели динамики гидравлического привода.

**Основная часть.** Для гидравлических тормозных систем автомобилей особо большой грузоподъемности было предложено схемное решение<sup>2</sup>, разделяющее поток рабочей жидкости на основной и вспомогательный путем установки дополнительного клапана с гидравлическим управлением параллельно основному, что позволяет минимизировать инерционность элементов гидравлического модулятора с целью обеспечения заданного

<sup>1</sup> Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения: Правила ЕЭК ООН № 13 (10)/Пересмотр 6. – Минск, 2010. – 276 с.

<sup>2</sup> Гидравлический модулятор для тормозной системы транспортного средства: пат. 19812 Респ. Беларусь, МПК В 60Т 8/48 / М.И. Жилевич, С.В. Ермилов. – Опубл. 30.12.2013.

быстродействия антиблокировочной системы при первом экстренном торможении, когда расход рабочей жидкости имеет максимальное значение. На рисунке 1 представлена гидравлическая тормозная система с АБС автомобиля особо большой грузоподъемности (карьерного самосвала).

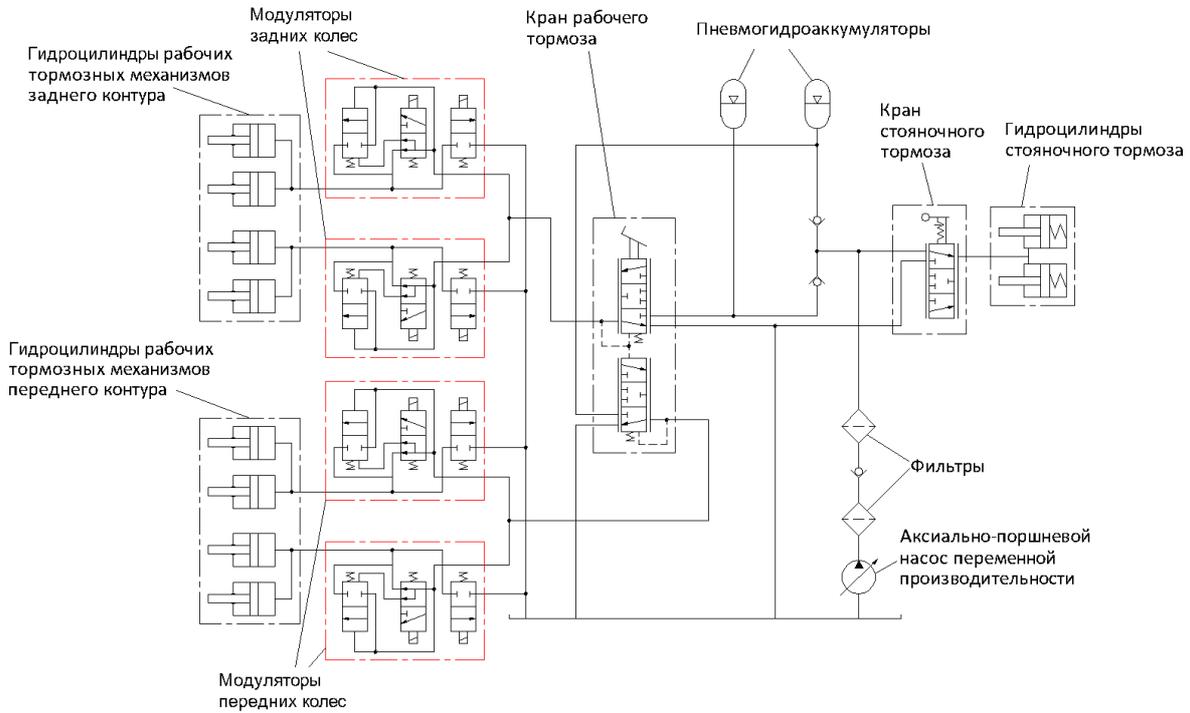


Рисунок 1. – Принципиальная схема тормозного гидропривода с антиблокировочной системой карьерного самосвала

Данной принципиальной схеме (см. рисунок 1) соответствует расчетная схема, приведенная на рисунке 2, на которой приняты следующие обозначения:  $m_i, x_i, R_i, l_i, f_i$  – соответственно масса жидкости, перемещение столба жидкости, сопротивление, длина и площадь  $i$ -го трубопровода ( $i = 1 \dots 17$  – номер трубопровода);  $\Psi(p_j)$  – коэффициент, учитывающий податливость рабочей жидкости в  $j$ -м узле ( $j = 1 \dots 31$  – номер узловой точки);  $z_k$  – перемещение  $k$ -го поршня ( $k = 1 \dots 4$  – номер поршня); ПЛ, ПП, ЗЛ, ЗП – соответственно передний левый и правый и задний левый и правый гидроцилиндры по отношению к колесам автомобиля; ПГА – пневмогидроаккумулятор.

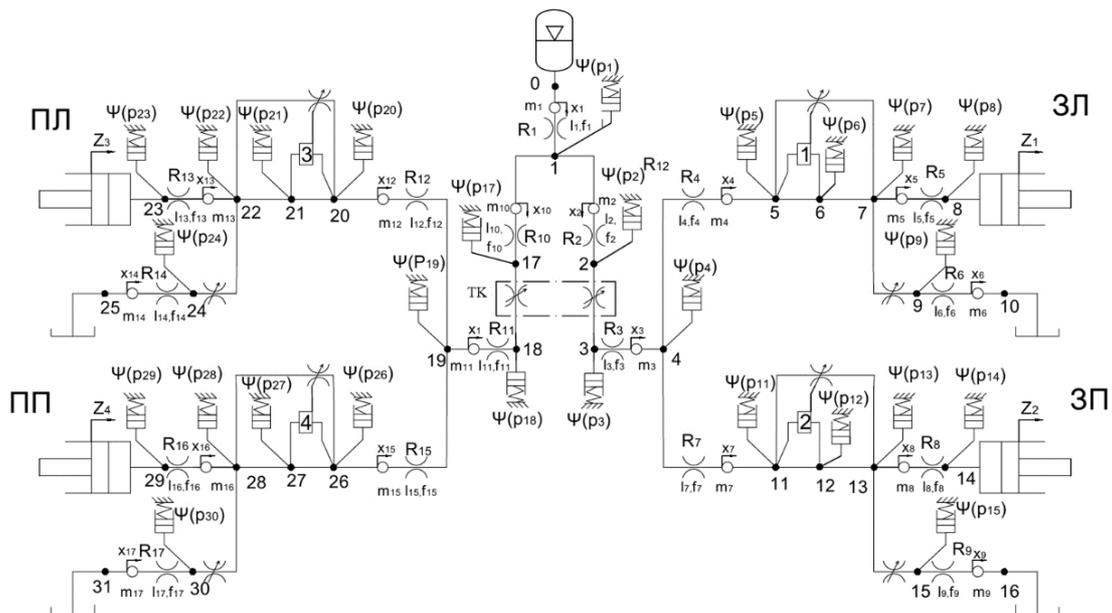


Рисунок 2. – Расчетная схема тормозного гидропривода с антиблокировочной системой карьерного самосвала

На основании методики, представленной в [1], была получена математическая модель, описывающая динамику тормозного привода с АБС как систему с сосредоточенными параметрами<sup>3</sup>.

По разработанной математической модели тормозного гидропривода с предлагаемым модулятором АБС была составлена программа и выполнены расчеты, позволившие оценить влияние параметров предложенного модулятора<sup>4</sup> на быстрдействие исследуемого тормозного привода при первом экстренном торможении, а также динамические характеристики при работе модулятора в циклическом режиме путем многовариантного анализа.

Из расчетной схемы (см. рисунок 2) видно, что контуры тормозного привода с АБС схожи. Следовательно, достаточно исследовать более подробно только один из них.

Расчет проводился для базового набора исходных данных, а также для данных, полученных путем варьирования значений параметров привода. Базовый набор данных был принят на основе предварительного статического расчета [4; 5] и представлен в таблице 1, варьируемые параметры – в таблице 2.

Таблица 1. – Основные исходные данные

Параметр и единицы измерения	Величина
<i>I</i>	2
Максимальное давление, МПа	10
Давление в сливной линии, МПа	0
Длина напорного трубопровода, м	3,3
сливного трубопровода, м	3,3
Коэффициент местного сопротивления в напорном трубопроводе	10
в сливном трубопроводе	10
в трубопроводе модулятор-цилиндр	10
Коэффициент, зависящий от шероховатости трубопровода напорный	0,02
сливной	0,02
трубопровод модулятор-цилиндр	0,02
Эквивалентный диаметр цилиндра, м	0,134
Максимальный ход поршня цилиндра, м	0,005
Начальное положение поршня, м	0
Постоянная (начальная) нагрузка, кН	0,25
Жесткость эквивалентной пружины, кН/м	7500
Приведенная масса подвижных элементов, кг	100
Сила сухого трения, Н	0
Сила вязкого трения, Н/м	0
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	880
Базовый модуль упругости, Па	1,8·10 <sup>9</sup>
Коэффициент модуля упругости, учитывающий давление	10
Коэффициент расхода впускного клапана P1	0,6
выпускного клапана P2	0,6
вспомогательного клапана P3	0,6
Время расчета, с	0,5
Диаметр золотника впускного клапана P1, мм	8
выпускного клапана P2, мм	8
вспомогательного клапана P3, мм	16
Ход золотника впускного клапана P1, мм	1
выпускного клапана P2, мм	1
вспомогательного клапана P3, мм	1,5
Диаметр тормозного крана, мм	25
Время срабатывания тормозного крана, с	0,1
Время начального торможения, с	0,2
Диаметр поршня пневмогидроаккумулятора, м	0,165

<sup>3</sup> Выполнить исследования, обосновать параметры и разработать техническую документацию антиблокировочной и противобуксировочной системы (АБС и ПБС) для карьерных самосвалов с гидравлическим тормозным приводом [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключительный): 1313/17пб-600-01412 / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. нац. техн. ун-т; рук. М.И. Жилевич; исполн.: П.Н. Кишкевич [и др.]; соисполн.: Е.М. Заболоцкий [и др.]. – Минск: [б. и.], 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-RW). – № ГР 20170832.

<sup>4</sup> Гидравлический модулятор для тормозной системы транспортного средства: пат. 19812 Респ. Беларусь, МПК В 60Т 8/48 / М.И. Жилевич, С.В. Ермилов. – Опубл. 30.12.2013.

Окончание таблицы 1

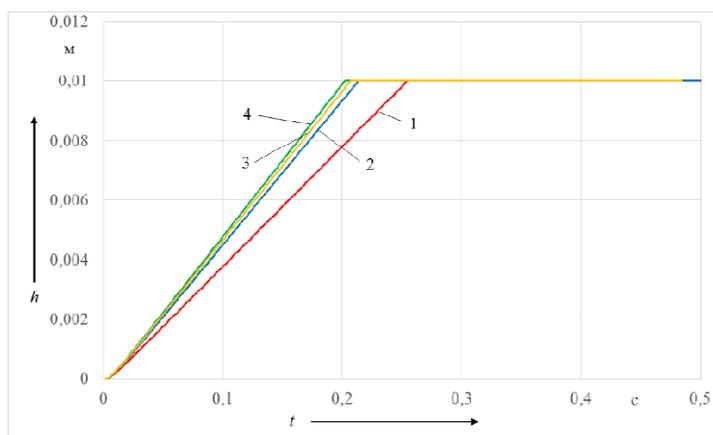
1	2
Полный объем пневмогидроаккумулятора, м <sup>3</sup>	0,0044
Масса золотника вспомогательного клапана РЗ, кг	0,150
Жесткость пружины вспомогательного клапана РЗ, Н/м	200

Таблица 2. – Варьируемые параметры

Параметр и единицы измерения	Величина
Длина трубопровода модулятор-цилиндр, м	0,55; 1,10; 2,20
Диаметр трубопровода напорного, мм сливного, мм модулятор-цилиндр, мм	8; 10; 12; 16 8; 10; 12; 16 8; 10; 12; 16
Время срабатывания впускного клапана Р1, с выпускного клапана Р2, с	0,0179; 0,0142; 0,012 0,0179; 0,0142; 0,012
Время фазы торможения, с оттормаживания, с выдержки давления, с	0,0179; 0,0142; 0,012 0,0179; 0,0142; 0,012 0,0179; 0,0142; 0,012; 0
Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с	30·10 <sup>-6</sup> ; 55·10 <sup>-6</sup> ; 80·10 <sup>-6</sup>
Частота срабатывания модулятора, Гц	8; 10; 12

Анализ расчетов показывает, что предложенное разделение потока на основной и вспомогательный путем параллельного включения вспомогательного клапана РЗ дает возможность значительно снизить перепад давления на гидравлическом модуляторе АБС. Так, применение вспомогательного клапана РЗ с диаметром запорного элемента  $d_{\text{зол3}} = 16$  мм позволяет уменьшить значение перепада давлений приблизительно в 23 раза (с 0,673 МПа до 0,030 МПа). Увеличением диаметра  $d_{\text{зол3}}$  можно снизить перепад давлений до и после предлагаемого модулятора на большее значение. Однако с ростом диаметра золотника эта величина уменьшается незначительно и для значений 20, 25 и 32 мм будет соответственно 0,024; 0,017 и 0,012 МПа.

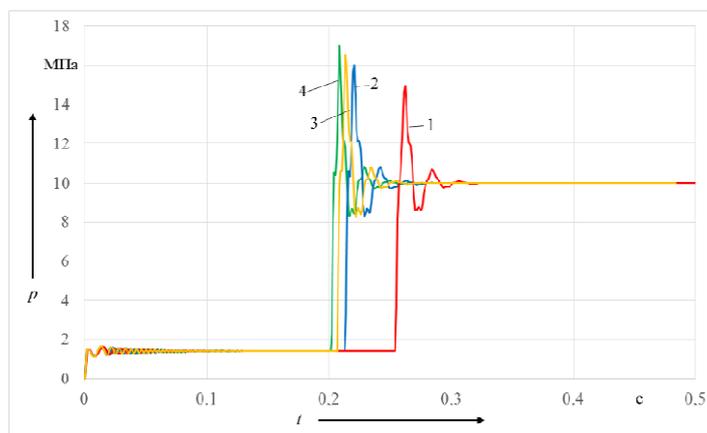
Также наличие вспомогательного клапана оказывает положительный эффект на быстрдействие рассматриваемого участка тормозного привода в целом. Результаты расчета, приведенные на рисунке 3, показали, что при применении стандартного модулятора время срабатывания привода составляет 0,251 с. Предлагаемый модулятор с вспомогательным клапаном с золотником диаметра  $d_{\text{зол3}} = 16$  мм позволяет уменьшить перемещение поршня гидроцилиндра на максимальную величину на 0,029 с, что составляет приблизительно 11,5% от времени торможения при применении стандартного модулятора в той же системе. При значении диаметра запорного элемента  $d_{\text{зол3}} = 20$  мм время срабатывания привода составляет 0,21 с, при  $d_{\text{зол3}} = 25$  мм – 0,205 с,  $d_{\text{зол3}} = 32$  мм – 0,202 с, т.е. увеличение быстрдействия незначительное.



1 – стандартный модулятор; 2 – предлагаемый модулятор с  $d_{\text{зол3}} = 16$  мм;  
3 – предлагаемый модулятор с  $d_{\text{зол3}} = 20$  мм; 4 – предлагаемый модулятор с  $d_{\text{зол3}} = 32$  мм

Рисунок 3. – Влияние величины диаметра золотника дополнительного клапана РЗ на скорость перемещения поршня исполнительного гидроцилиндра

Увеличение диаметра  $d_{\text{зол3}}$  дополнительного клапана приводит к повышению величины перерегулирования, что видно на графике, представленном на рисунке 4. Согласно графику значение перерегулирования стандартной системы составляет  $\sigma = 51,3\%$ . Введение вспомогательного клапана с диаметром золотника  $d_{\text{зол3}} = 16$  мм увеличивает значение перерегулирования до  $\sigma = 60,7\%$ . При  $d_{\text{зол3}} = 20$  мм перерегулирование составит  $\sigma = 65,2\%$ , при  $d_{\text{зол3}} = 32$  мм  $\sigma = 69,6\%$ , т.е. перерегулирование возрастает.



**1 – стандартный модулятор; 2 – предлагаемый модулятор с  $d_{зол.з} = 16$  мм;  
3 – предлагаемый модулятор с  $d_{зол.з} = 20$  мм; 4 – предлагаемый модулятор с  $d_{зол.з} = 32$  мм**

**Рисунок 4. – Влияние величины диаметра золотника вспомогательного клапана РЗ на давление в исполнительном гидроцилиндре**

При циклическом торможении-оттормаживании падение давления происходит практически мгновенно, но не достигает нуля. Это позволяет реализовать как двухфазный, так и трехфазный алгоритмы работы предложенного модулятора с выдержкой давления необходимой величины после фазы оттормаживания. Поэтому при последующих торможениях требуется значительно меньшее количество рабочей жидкости и время, необходимое для наполнения гидроцилиндра, будет меньше. Таким образом, быстродействие привода зависит лишь от процесса нарастания давления, величина которого влияет и на тормозной момент.

Характер переходного процесса при различных частотах практически не меняется независимо от двух- либо трехфазного алгоритма работы модулятора. Наибольшее влияние изменение частоты работы модулятора оказывает на движение штока гидроцилиндра в обратном направлении во время фазы уменьшения давления, причем при двухфазном алгоритме перемещение штока увеличивается. Применение трехфазного алгоритма и повышение частоты срабатывания модулятора позволяют уменьшить расход жидкости в гидроаккумуляторе.

В работе<sup>5</sup> приведена программа испытаний автомобиля особо большой грузоподъемности с гидравлической тормозной системой с АБС. Испытания проводились на груженом и снаряженном автомобиле на участках полигона с различными покрытиями и на дороге с уклоном 8% с утрамбованным щебеночным покрытием [6].

По результатам испытаний дополнительно установлено, что при плавных торможениях груженого и снаряженного автомобиля особо большой грузоподъемности в системе отсутствуют автоколебания во всем диапазоне изменения угла нажатия тормозной педали, первоочередное включение задних тормозов, приблизительно одинаковые давления на выходах модуляторов одной оси, повышение давлений в начальный момент торможения. Кроме того, было оценено быстродействие тормозного привода с АБС при первом экстренном торможении. Для снаряженной машины время срабатывания составляет 0,55...0,6/(0,5...0,6) с, для груженой – 0,5/0,6 с для передних/задних тормозных механизмов соответственно, что удовлетворяет требованиям по быстродействию тормозного привода.

Торможение самосвала проводилось в одинаковых дорожных условиях с выключенной и включенной АБС.

Работоспособность АБС была обеспечена при всех записанных испытаниях, разворота самосвала при торможении не отмечено.

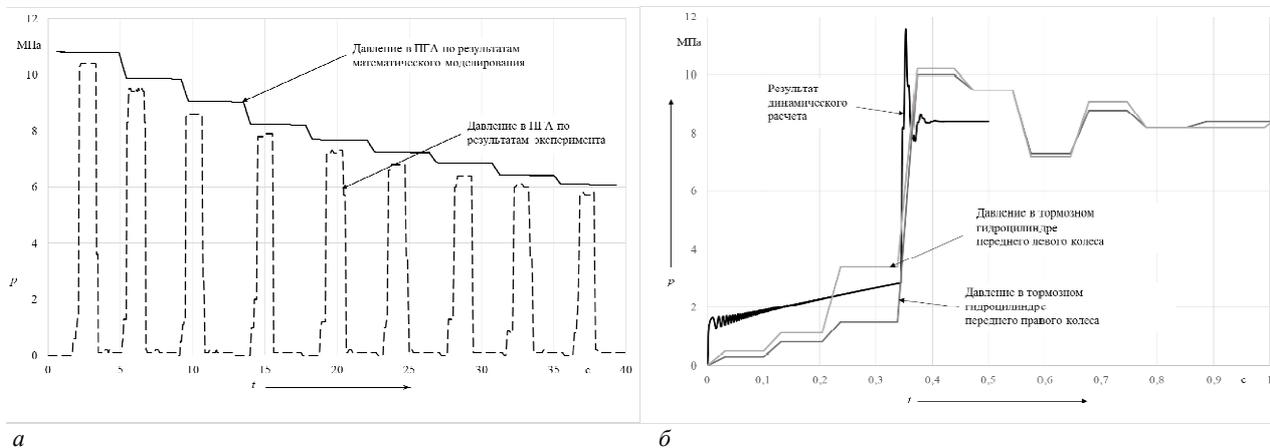
В передних тормозах при работе АБС наблюдались характерные циклы затормаживания-растормаживания с изменением давления от 0,1 до 7,2 МПа, при снижении скорости ниже 2,78 м/с (10 км/ч) и отключении АБС обеспечивается давление от 3,9 до 4,5 МПа.

При работе АБС в задних тормозах наблюдается количество циклов затормаживания-растормаживания при торможении со скорости 13...15 м/с – 6–7 м/с в течение 5...6 с.

На рисунке 5 представлено сравнение результатов динамического расчета и эксперимента, показавшее, что допущения, принятые в ходе математического моделирования, не оказали существенного влияния на ре-

<sup>5</sup> Выполнить исследования, обосновать параметры и разработать техническую документацию антиблокировочной и противобуксировочной системы (АБС и ПБС) для карьерных самосвалов с гидравлическим тормозным приводом [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключительный): 1313/17пб-600-01412 / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. нац. техн. ун-т; рук. М.И. Жилевич; исполн.: П.Н. Кишкевич [и др.]; соисполн.: Е.М. Заболоцкий [и др.]. – Минск: [б. и.], 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-RW). – № ГР 20170832.

зультаты аналитического исследования (расхождение результатов не превышает 5–7%), что подтверждает возможность использования разработанных математических моделей при проектировании гидравлических тормозных приводов и модуляторов при оснащении автомобилей особо большой грузоподъемности АБС



**а** – энергоемкость пневмогидроаккумулятора; **б** – давление в тормозном гидроцилиндре

**Рисунок 5. – Сравнение результатов динамического расчета и эксперимента**

**Заключение.** На основании вышеизложенного следует:

1) разработаны рекомендации по выбору рациональных конструктивных параметров предлагаемого модулятора, позволяющие выполнить анализ влияния на динамические характеристики и устойчивость работы тормозного гидропривода с АБС. Полученные расчетные динамические характеристики привода по качественным признакам соответствуют ожидаемым, что подтверждает адекватность предложенной модели. Расхождение результатов динамического расчета и экспериментальных исследований не превышает 5–7%, что подтверждает правильность разработанных математических моделей;

2) выполнены испытания автомобиля особо большой грузоподъемности, оснащенного АБС, при различных режимах эксплуатации и подтверждена работоспособность АБС. Результаты испытаний тормозной системы с АБС в составе карьерного самосвала БелАЗ 7555 показали среднюю скорость срабатывания привода 0,5–0,6 с, что соответствует требованиям СТБ 1641-2006.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
2. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика / Г.А. Аврунин, И.В. Грицай, И.Г. Кириченко и др. – Харьков: ХНАДУ, 2008. – 412 с.
3. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учеб. для машиностр. вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – 4-е изд., стереотип., перепечатка со второго изд. 1982 г. – М.: Альянс, 2010. – 423 с.
4. Ермилов С.В., Жилевич М.И. Расчетные исследования и анализ расходно-перепадных характеристик модулятора гидравлической антиблокировочной системы для автомобилей особо большой грузоподъемности // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер.: Машиностроение. – 2020. – № 4(122). – С. 40–43. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-122-4-40-43
5. Method of calculating the design parameters of a modulator anti-lock braking system with a high flow of working fluid / M. Zhilevich, S. Ermilov, D. Kapski et al. // Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport. – 2021. – Vol. 110. – P. 199–210. DOI: 10.20858/sjsutst.2021.110.16
6. Жилевич М.И., Ермилов С.В. Методика и результаты стендовых испытаний макета гидравлического модулятора тормозной системы транспортного средства // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 108–113.

#### REFERENCES

1. Metlyuk, N.F. & Aytushko, V.P. (1980). *Dinamika pnevmaticheskikh i gidravlicheskh privodov avtomobilei*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
2. Avrunin, G.A., Gritsai, I.V., Kirichenko, I.G., Moroz, I.I. & Shcherbak, O.V. (2008). *Ob'emnyi gidroprivod i gidropnevmoavtomatika*. Khar'kov: KhNADU. (In Russ.)
3. Bashta, T.M., Rudnev, S.S., Nekrasov, B.B., Baibakov, O.V. & Kirillovskii, Yu.L. (2010). *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody*. Moscow: Al'yans. (In Russ.)
4. Ermilov, S.V. & Zhilevich, M.I. (2020). Raschetnye issledovaniya i analiz raskhodno-perepadnykh kharakteristik modulyatora gidravlicheskoj antiblokirovочноi sistemy dlya avtomobilei osobo bol'shoi gruzopod'emnosti [Calculation

- studies and analysis of flow-drop characteristics of the modulator of a hydraulic anti-lock braking system for vehicles with particularly heavy load capacity]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Vestnik of Brest State Technical University. Series: Mechanical engineering]*, 4(122), 40–43. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-122-4-40-43 (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Zhilevich, M., Ermilov, S., Kapski, D., Vovk, Y., Lyashuk, O. & Vovk, I. (2021). Method of calculating the design parameters of a modulator anti-lock braking system with a high flow of working fluid. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport*, (110), 199–210. DOI: 10.20858/sjsutst.2021.110.16
  6. Zhilevich, M.I. & Ermilov S.V. (2022). Metodika i rezultaty stendovykh ispytani maketa gidravlicheskogo modulyatora tormoznoi sistemy transportnogo sredstva [Methodology and results of bench tests of the layout of the hydraulic modulator of the vehicle brake system]. In S.V. Kharitonchik (Eds.). *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* (108–113). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 09.01.2024

## STUDY OF THE DYNAMICS OF THE BRAKE DRIVE WITH AN ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM FOR A PARTICULARLY HEAVY-DUTY VEHICLE

**S. ERMILOV, M. ZHILEVICH, D. KAPSKI**  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The article analyzes the results of a multivariate calculation of the dynamics of a hydraulic brake drive with an anti-lock braking system for a particularly heavy-duty vehicle and performed it. The conditions for conducting road tests of such a car with an anti-lock braking system installed on it are given and the results of experimental studies are analyzed. An assessment was made of the influence of the accepted assumptions on the behavior of some parameters of such a drive by comparing the final characteristics obtained during analytical and experimental studies, which made it possible to determine the adequacy of the mathematical model.*

**Keywords:** anti-lock braking system (ABS), hydraulic brake drive, heavy-duty vehicle, hydraulic drive dynamics.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЕДЕЛ КЛАПАНОВ

канд. техн. наук, доц. Г.А. ВЕРЕМЕЙ

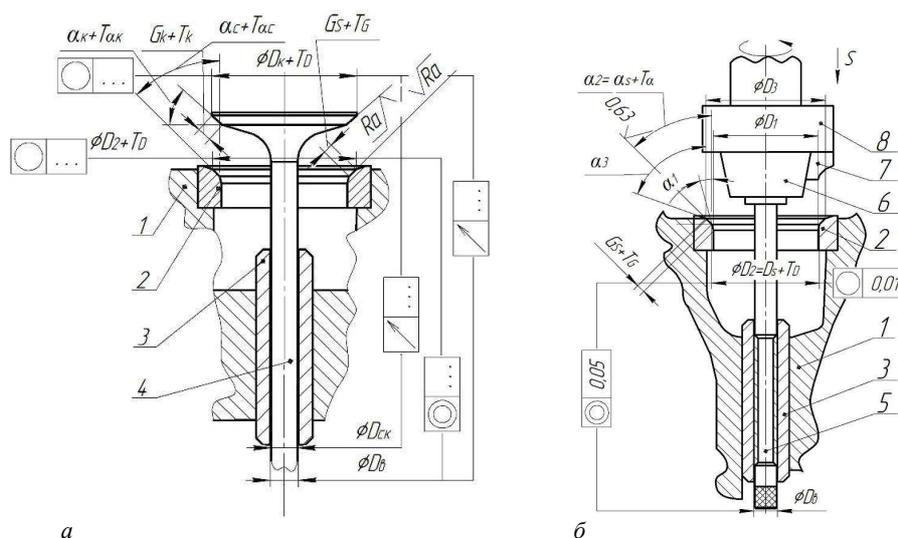
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Изложена методика исследования параметров точности формообразования в процессе обработки седел клапанов газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания в авторемонтном производстве. Практическая реализация данной методики проведена с помощью лазерных триангуляционных датчиков на базе разработанного приспособления для растачивания седел клапанов. Получены экспериментальные зависимости смещения режущего инструмента от различных режимов обработки. Даны практические рекомендации по выбору диапазонов режимов резания для обеспечения требуемых параметров точности при восстановлении седел клапанов.

**Ключевые слова:** седла клапанов, точность обработки, отклонение от круглости, восстановительный ремонт, лазерные триангуляционные датчики, параметры точности, изношенные поверхности седел клапанов, авторемонтное производство.

**Введение.** В современном авторемонтном производстве имеет место проблематика обеспечения точности формообразования седел клапанов в процессах восстановления газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС)<sup>1,2</sup> [1–4].

От точности формообразования, характеризуемой отклонением от круглости рабочей фаски седла клапана (диаметр  $D_2$ ), зависят эксплуатационные характеристики ДВС (рисунок 1)<sup>1,2</sup> [4].



**а** – сопряжения клапан-седло в ГРМ; **б** – восстанавливаемой рабочей поверхности седла клапана;  
1 – блок ДВС; 2 – седло клапана; 3 – втулка клапана; 4 – клапан; 5 – направляющий пилот;  
6 – шпиндель; 7 – режущий инструмент; 8 – контрольный элемент

Рисунок 1. – Параметры точности

Как показывают исследования, при наличии погрешности формы, превышающей допустимое отклонение от круглости ( $\Delta r$ ), имеют место утечки топливовоздушной смеси в результате негерметичности сопряжения клапан-седло в ГРМ, которые приводят к потере мощности двигателя до 10%<sup>2</sup>.

**Анализ исследований и публикаций.** Накопленный опыт в процессах обработки седел клапанов ГРМ, проработка научных публикаций, официальных источников информации, патентных баз и архивов, а также результаты исследований показали, что обеспечение конструкторски заданного отклонения от круглости  $\Delta r$  технологически в основном производстве достигается за счет обеспечения точности элементов системы СПИД (станок-

<sup>1</sup> Кальченко В.И., Кальченко В.В., Веремей Г.А. Технологические методы достижения точности сопряжения «клапан-седло» в двигателе внутреннего сгорания // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы: материалы XIV междунар. науч.-техн. конф. / Севастополь (12–17 сент. 2011 г.). – 2011. – № 121. – С. 18–21.

<sup>2</sup> Веремей Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. – Чернигов, ЧНТУ, 2015. – 183 л.

приспособление-инструмент-деталь) на станках с ЧПУ (числовым программным управлением)<sup>3,4</sup>[1; 2]. Эксплуатация подобного оборудования в авторемонтном производстве экономически нецелесообразна, т.к. требует применения специальных приспособлений и исследования процесса формообразования рабочей фаски седла клапана практическими методами. Дополнительно был сделан вывод, что в существующих современных восстановительных технологиях седел клапанов отсутствуют практические рекомендации по обеспечению требуемого параметра точности в зависимости от режимов обработки.

**Цель работы:** разработать методику исследования влияния режимов обработки при восстановлении рабочей поверхности седла клапана на специальном приспособлении для растачивания.

**Основная часть.** Исследование параметров точности формообразования в процессе обработки седел клапанов осуществлялось с целью проверки адекватности полученных расчетным путем ожидаемых результатов методики планирования эксперимента<sup>3</sup>. Поскольку в данной работе в задачах не ставился вопрос исследования динамических явлений в процессе восстановления по причине низких скоростей резания малых объемов срезаемого материала, возникла необходимость в проведении эксперимента по выявлению величины смещений шпинделя в зависимости от переменных режимов обработки.

В работе предлагается методика экспериментального исследования влияния различных режимов резания на точность формообразования рабочей фаски седла клапана. Суть методики заключается в контроле величины радиальных перемещений шпинделя в ортогональной плоскости к оси его вращения с помощью лазерных триангуляционных датчиков. Проведение данного эксперимента осуществлялось в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.



Рисунок 2. – Логическая схема экспериментального исследования

Объектом исследования были выбраны экспериментальные седла клапанов головок блоков 4-цилиндрового 8-клапанного ДВС модели ВАЗ-2108 (рисунок 3), имеющие явные признаки износа в процессе эксплуатации. Седла подвергались процессу дефектации, по результатам которой были сделаны выводы о целесообразности проведения восстановительного ремонта [5].

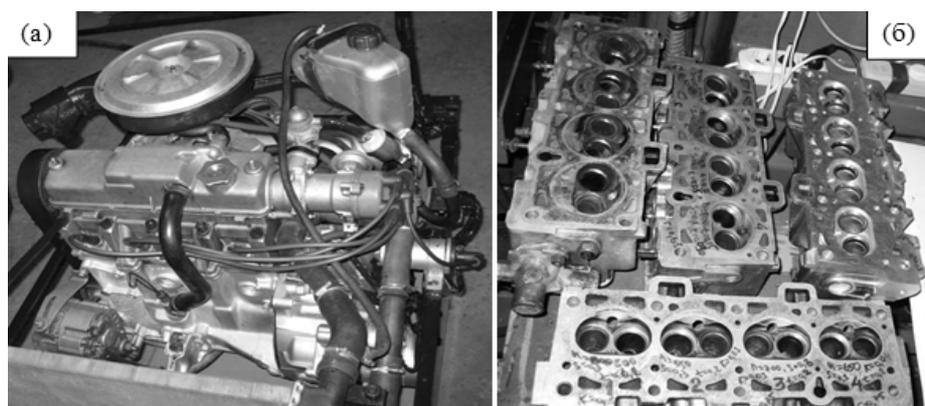
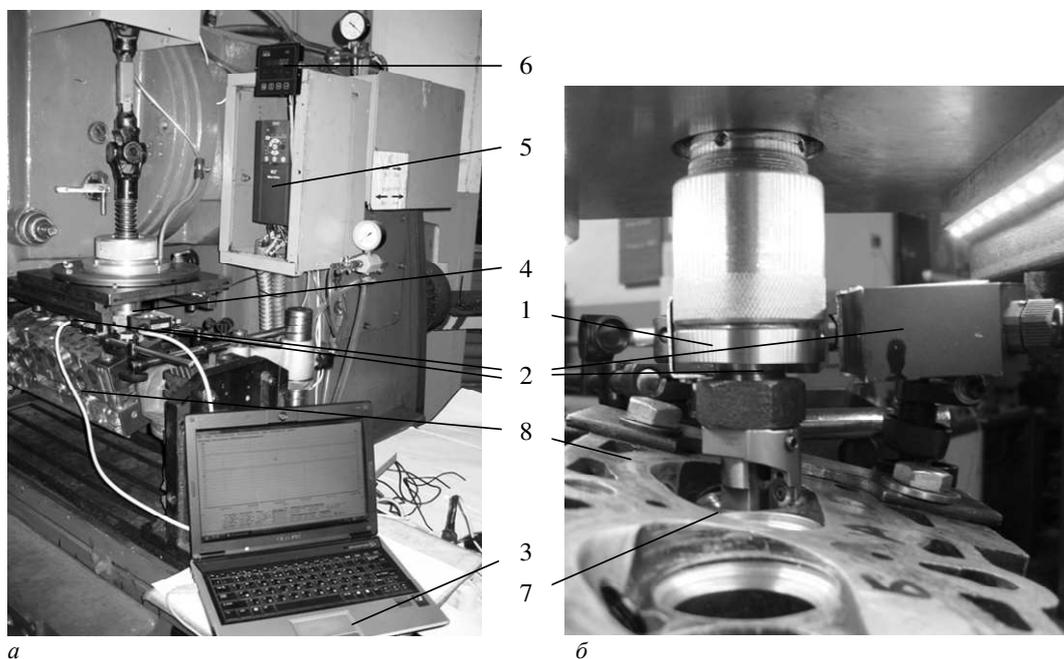


Рисунок 3. – Экспериментальный двигатель (а) и головки блока ВАЗ-2108 (б)

<sup>3</sup> Веремей Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. – Чернигов, ЧНТУ, 2015. – 183 л.

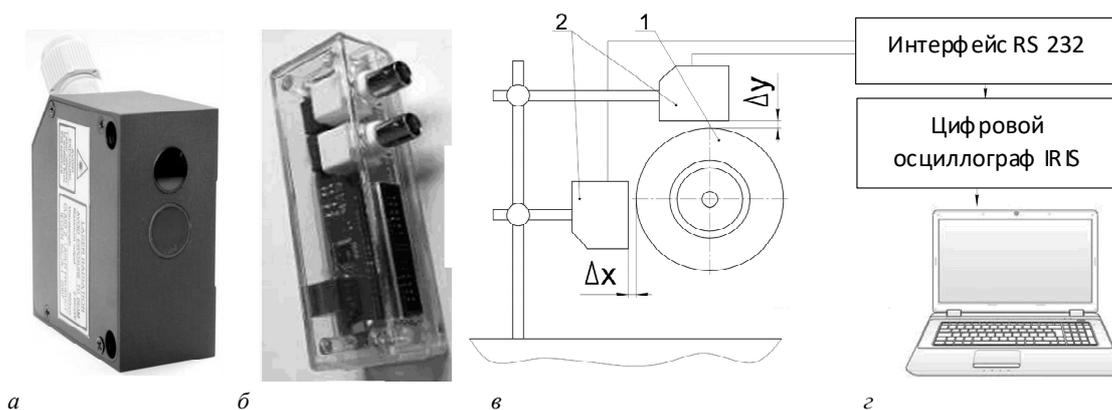
<sup>4</sup> Кальченко В.И., Кальченко В.В., Веремей Г.А. Технологические методы достижения точности сопряжения «клапан-седло» в двигателе внутреннего сгорания // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы: материалы XIV междунар. науч.-техн. конф. / Севастополь (12–17 сент. 2011 г.). – 2011. – № 121. – С. 18–21.

Эксперимент проводился на базе специального технологического оборудования для обработки седел клапанов, разработанного и изготовленного ранее (рисунок 4) [6]. При этом использовался комплекс контрольной аппаратуры (рисунки 5, а, б, в): два бесконтактных триангуляционных лазерных датчика, цифровой осциллограф, ноутбук с программным обеспечением. Схема определения перемещений шпинделя ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) представлена на рисунке 5, в.



1 – контрольный элемент; 2 – лазерные датчики;  
3 – компьютер; 4 – шпиндель обрабатывающего приспособления; 5 – электрический вариатор частот;  
6 – электронный тахометр; 7 – седло клапана; 8 – блок ДВС

Рисунок 4. – Общий вид комплекса для обработки седел клапанов (а)  
и аппаратуры для контроля радиальных перемещений шпинделя (б)



а – лазерные триангуляционные датчики; б – цифровой осциллограф; з – компьютер

Рисунок 5. – Структурная схема подключения датчиков (в) и общий вид измерительного комплекса

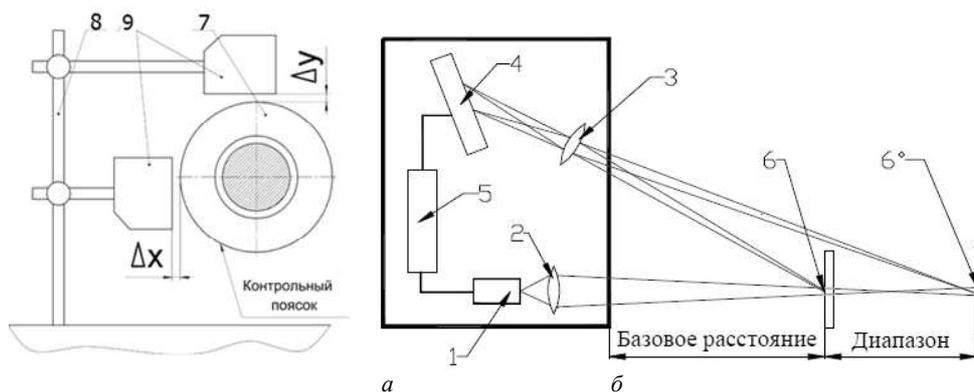
При проведении измерений устанавливалась жесткая изолированная отдельная стойка 8 с двумя бесконтактными триангуляционными лазерными датчиками 1 типа РФ603.2-10 / 2-485-U-IN-AL-CG (рисунок 6, а), расположенными под углом  $90^\circ$ , что соответствует декартовой системе координат. Датчики не требуют усилительных устройств и имеют возможность вывода выходного сигнала как в аналоговой, так и цифровой форме<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Триангуляционные лазерные датчики. Серия РФ603. Руководство по эксплуатации. – Минск: РИФТЭК, 2011. – 46 с.

Рабочий диапазон датчиков составляет 2 мм, линейность  $\pm 0,002$  мм, разрешающая способность 0,2 мкм, максимальная частота дискретизации 9,4 кГц. Регистрация и отображение сигналов с лазерных датчиков реализовывалась с помощью цифрового осциллографа IRIS и ноутбука с программным обеспечением для цифровой обработки сигналов (см. рисунки 5, а, б, з).

Цифровые осциллографы IRIS могут работать в режимах двухканального осциллографа, самописца, 16-канального логического анализатора, 8-канального логического генератора. Максимальная частота дискретизации сигнала регистрируется осциллографом – 100 кГц<sup>6</sup>.

Излучение полупроводникового лазера 1 фокусируется объективом 2 на объекте 6. Рассеянное на объекте излучение объективом 3 собирается на линейке 4. Процессор сигналов 5 рассчитывает расстояние до объекта (контрольного пояса прецизионной оправки) по положению изображения светового пятна на линейке 4 (рисунок 6, б).



1 – лазер; 2, 3 – объективы; 4 – CMOS-линейка; 5 – процессор сигналов; 6 – контролируемый объект; 7 – прецизионная оправка; 8 – установочная стойка; 9 – датчики

Рисунок 6. – Схема установки (а) и принцип функционирования лазерных триангуляционных датчиков (б)

С целью минимизации влияния отклонений формы контрольного пояса прецизионной оправки 7 на показания измерения датчиков (см. рисунок 6, а) и повышения точности относительного расположения ее основной базы относительно исполнительных поверхностей окончательная обработка оправки проводилась в сборе с валом шпинделя приспособления для растачивания седел клапанов. При этом финишная операция шлифования оправки осуществлялась за один установ с цилиндрической поверхностью вала под подшипники на прецизионном оборудовании, что позволило добиться максимального радиального биения контрольного пояса 1,0 мкм.

Точность взаимного расположения датчиков под углом 90° обеспечивалась совмещением лазерных лучей с рисками на торце контрольного пояса прецизионной оправки 7 (см. рисунок 6, а). Риски наносились с использованием делительной головки с точностью  $\pm 0,05^\circ$ .

Перед началом каждой серии экспериментов определялись исходные положения  $x_0$ ,  $y_0$ , точки отражения лазерного луча каждого из датчиков относительно начала рабочего диапазона  $S$  (рисунок 7):

$$x_0 = \frac{U_{0x}}{U_{\max}} S, y_0 = \frac{U_{0y}}{U_{\max}} S, \quad (1)$$

где  $U_{0x}$ ,  $U_{0y}$  – среднеарифметические значения сигнала лазерного датчика при неподвижном шпинделе;  
 $U_{\max}$  – максимальное значение выходного сигнала лазерного датчика,  $U_{\max} = 10$  В;  
 $S$  – рабочий диапазон лазерных датчиков,  $S = 2$  мм.

В соответствии со схемой (см. рисунок 1) настраивалось оборудование для обработки и осуществлялся ряд экспериментов по обработке седел клапанов при различных режимах резания  $n$  (мин<sup>-1</sup>) и  $S$  (мм/об) с фиксированием лазерными датчиками за определенный промежуток времени дискретного набора значений смещений шпинделя в плоскости, ортогональной оси его вращения. Все эксперименты проводились при одинаковых внешних условиях помех и климата.

<sup>6</sup> Цифровой осциллограф IRIS. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Киев: Видео Интернет Технологии, 2007. – 12 с.

Результаты измерений записывались в базу данных программного обеспечения осциллографа IRIS в файл формата «.xls», после чего в программе Microsoft Office Excel определялось смещение оси шпинделя в линейных величинах по следующим зависимостям:

$$\Delta x_i = \frac{U_{x_i}}{U_{\max}} S - x_0, \quad \Delta y_i = \frac{U_{y_i}}{U_{\max}} S - y_0, \quad (2)$$

где  $U_{x_i}$ ,  $U_{y_i}$  – сигнал датчика в соответствующий момент времени.

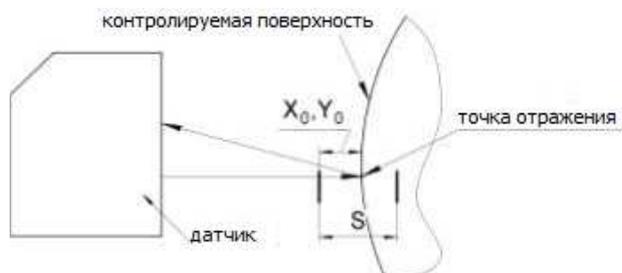


Рисунок 7. – Схема определения начального положения точки отражения лазерного луча

На рисунке 8 приведен результат записи смещений оси шпинделя в неподвижном положении при включенных органах элементов управления станком, построенных с помощью средств Microsoft Office Excel.

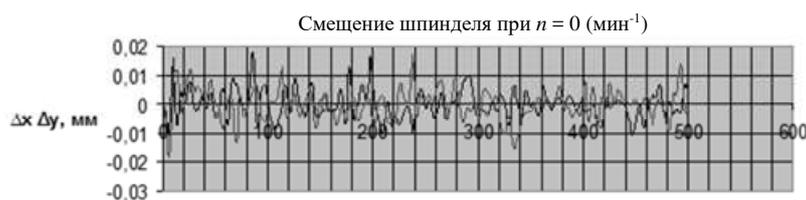


Рисунок 8. – Диаграмма смещений неподвижного шпинделя по результатам измерений двух датчиков

При анализе диаграммы (см. рисунок 8) видно, что в силу высокой чувствительности датчиков и присутствия немалого количества шумов и помех из внешней среды при проведении эксперимента полученная погрешность измерений должна быть учтена без учета максимальных выбросов с целью повышения степени объективности получения результатов.

Для получения аппроксимированной оценки погрешности измерений данного высокочувствительного оборудования был проведен дополнительный эксперимент, дающий индикацию реального биения шпинделя  $\Delta$  в подшипниках (с учетом погрешности формы контрольной оправки вала шпинделя 1 мкм).

В диапазоне частот вращения шпинделя  $n = 200 \div 600$  мин<sup>-1</sup> при установленном на пояске контрольной оправки индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм, шагом 100 мин<sup>-1</sup> наблюдалась тенденция изменения биения шпинделя (рисунок 9). Результаты измерений составили  $\Delta_{\min} = 0,002$  мм и  $\Delta_{\max} = 0,003$  мм при частотах вращения  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> и  $n = 600$  мин<sup>-1</sup>, соответственно.

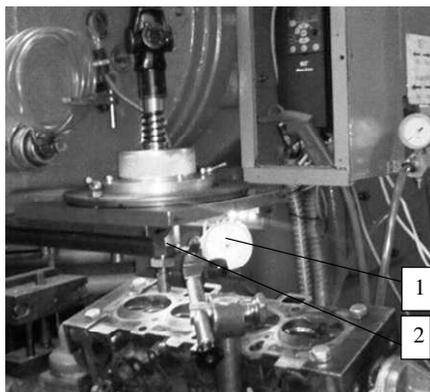
Сделан вывод, что тенденция увеличения биения связана с увеличением центробежной силы, приводящей к изменениям контактной жесткости в соединении вала и подшипников в пределах 1 мкм.

В результате проверки величины биения контрольного пояска при отсутствии вращения вала показание индикатора составило  $\Delta_0 < 0,002$  мм. На основании этого для получения корректных данных при исследовании биения шпинделя в процессе резания был принят поправочный коэффициент  $f_n = 0,1$ , учитывающий погрешность измерений лазерными датчиками.

Дальнейшее проведение исследования смещений шпинделя осуществлялось во время обработки седел клапанов при варьировании показателями режимов резания в пределах, установленных в соответствии с результатами процесса дефектации изношенных седел на основании интерполяционной математической модели в работе<sup>7</sup> и оптимизационной модели (в зависимости от объемов срезаемого материала)<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Zharii Y., Veremei N. The geometry mathematical modeling of the overhauled valve-seat surfaces in the valve timing gear // Aviation in the XXI-st century: Materials of the sixth world congress / Kyiv, Ukraine (23–25 сент. 2014 г.). – Киев, 2014. – Р. 17–21

<sup>8</sup> Веремей Г.А. Задача оптимизации в процессах дефектации и восстановления седел клапанов газораспределительных механизмов // Автомобиле- и тракторостроение: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. / Минск (24–27 мая 2019 г.). – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 2. – С. 112–117.



1 – индикатор часового типа; 2 – контрольная оправка

Рисунок 9. – Контроль биения шпинделя индикатором с ценой деления 0,002 мм

В соответствии с вышеуказанным были установлены следующие диапазоны:  $200 \leq n \leq 600$ ;  $0,02 \leq S \leq 0,15$ ;  $0,05 \leq t \leq 1$  ( $t$  – глубина резания, мм), а также построена теоретическая зависимость погрешности формы седла клапана от частоты вращения шпинделя и подачи после обработки в среде Math Cad (рисунок 10) по результатам математического моделирования планирования эксперимента<sup>9</sup>.

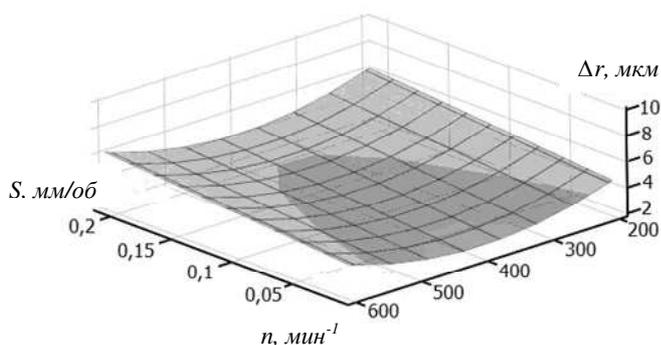


Рисунок 10. – Теоретическая зависимость отклонения формы  $\Delta r$  обработанной поверхности от округлости от режимов резания  $n$  и  $S$

Полученные результаты в виде сигналов датчиков  $U_1, U_2$  (таблица 1) были обработаны в среде Microsoft Office Excel по формулам (1) и (2) с учетом коэффициента  $f_n$  и выведены в виде графиков зависимостей  $\Delta x, \Delta y$  – максимального биения шпинделя от режимов резания  $n$  и  $S$  (таблица 2).

Таблица 1. – Результаты измерений смещений шпинделя  $U_1, U_2$  лазерными датчиками при различных режимах обработки  $n$  и  $S$

$n, \text{мин}^{-1}$ \ $S, \text{мм/об}$	0,02	0,06	0,1	0,14	$f_n, \text{Гц}$
200	$U_1 = 5,62$ $U_2 = 6,96$	$U_1 = 5,12$ $U_2 = 7,16$	$U_1 = 5,37$ $U_2 = 8,77$	$U_1 = 4,68$ $U_2 = 8,50$	50
300	$U_1 = 5,63$ $U_2 = 6,95$	$U_1 = 5,89$ $U_2 = 8,59$	$U_1 = 4,89$ $U_2 = 8,66$	$U_1 = 4,66$ $U_2 = 8,43$	100
400	$U_1 = 5,64$ $U_2 = 6,96$	$U_1 = 5,85$ $U_2 = 8,59$	$U_1 = 4,87$ $U_2 = 8,45$	$U_1 = 4,61$ $U_2 = 8,54$	125
500	$U_1 = 5,51$ $U_2 = 7,00$	$U_1 = 5,82$ $U_2 = 8,62$	$U_1 = 4,63$ $U_2 = 8,47$	$U_1 = 4,63$ $U_2 = 8,57$	167
600	$U_1 = 5,82$ $U_2 = 8,60$	$U_1 = 5,45$ $U_2 = 6,95$	$U_1 = 3,53$ $U_2 = 6,21$	$U_1 = 3,54$ $U_2 = 6,21$	200

<sup>9</sup> Веремей Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. – Чернигов, ЧНТУ, 2015. – 183 л.

Варьирование частоты вращения шпинделя в соответствии с планом эксперимента обеспечивало различную продолжительность обработки деталей. Поэтому для обеспечения одинакового количества измерений за один оборот шпинделя в процессе проведения экспериментов частоту дискретизации сигнала на осциллографе устанавливали пропорционально частоте вращения шпинделя в пределах  $f_d = 50\text{--}200$  Гц из расчета обеспечения каждым датчиком 50 измерений за один оборот шпинделя.

Таблица 2. – Графики зависимостей биения  $\Delta x, \Delta y$  шпинделя от режимов резания  $n$  и  $S$

№ эксперимента	Диаграмма зависимости	№ эксперимента	Диаграмма зависимости
1	<p><b><math>n=200</math> об/мин, <math>S=0,02</math> мм/об</b></p> <p>100 тчк; <math>f_d = 50</math> Гц; t, с</p>	6	<p><b><math>n=300</math> об/мин, <math>S=0,06</math> мм/об</b></p> <p>200 тчк; <math>f_d = 100</math> Гц; t, с</p>
2	<p><b><math>n=200</math> об/мин, <math>S=0,06</math> мм/об</b></p> <p>100 тчк; <math>f_d = 50</math> Гц; t, с</p>	7	<p><b><math>n=300</math> об/мин, <math>S=0,1</math> мм/об</b></p> <p>200 тчк; <math>f_d = 100</math> Гц; t, с</p>
3	<p><b><math>n=200</math> об/мин, <math>S=0,1</math> мм/об</b></p> <p>100 тчк; <math>f_d = 50</math> Гц; t, с</p>	8	<p><b><math>n=300</math> об/мин, <math>S=0,14</math> мм/об</b></p> <p>200 тчк; <math>f_d = 100</math> Гц; t, с</p>
4	<p><b><math>n=200</math> об/мин, <math>S=0,14</math> мм/об</b></p> <p>100 тчк; <math>f_d = 50</math> Гц; t, с</p>	9	<p><b><math>n=400</math> об/мин, <math>S=0,02</math> мм/об</b></p> <p>250 тчк; <math>f_d = 125</math> Гц; t, с</p>
5	<p><b><math>n=300</math> об/мин, <math>S=0,02</math> мм/об</b></p> <p>200 тчк; <math>f_d = 100</math> Гц; t, с</p>	10	<p><b><math>n=400</math> об/мин, <math>S=0,06</math> мм/об</b></p> <p>250 тчк; <math>f_d = 125</math> Гц; t, с</p>

Окончание таблицы 2

№ эксперимента	Диаграмма зависимости	№ эксперимента	Диаграмма зависимости
11	<p><b><math>n=400</math> об/мин, <math>S=0,1</math> мм/об</b></p> <p>250 тчк; <math>f_d = 125</math> Гц; t, с</p>	16	<p><b><math>n=500</math> об/мин, <math>S=0,14</math> мм/об</b></p> <p>330 тчк; <math>f_d = 167</math> Гц; t, с</p>
12	<p><b><math>n=400</math> об/мин, <math>S=0,14</math> мм/об</b></p> <p>250 тчк; <math>f_d = 125</math> Гц; t, с</p>	17	<p><b><math>n=600</math> об/мин, <math>S=0,02</math> мм/об</b></p> <p>400 тчк; <math>f_d = 200</math> Гц; t, с</p>
13	<p><b><math>n=500</math> об/мин, <math>S=0,02</math> мм/об</b></p> <p>330 тчк; <math>f_d = 167</math> Гц; t, с</p>	18	<p><b><math>n=600</math> об/мин, <math>S=0,06</math> мм/об</b></p> <p>500 тчк; <math>f_d = 200</math> Гц; t, с</p>
14	<p><b><math>n=500</math> об/мин, <math>S=0,06</math> мм/об</b></p> <p>330 тчк; <math>f_d = 167</math> Гц; t, с</p>	19	<p><b><math>n=600</math> об/мин, <math>S=0,1</math> мм/об</b></p> <p>500 тчк; <math>f_d = 200</math> Гц; t, с</p>
15	<p><b><math>n=500</math> об/мин, <math>S=0,1</math> мм/об</b></p> <p>330 тчк; <math>f_d = 167</math> Гц; t, с</p>	20	<p><b><math>n=600</math> об/мин, <math>S=0,14</math> мм/об</b></p> <p>500 тчк; <math>f_d = 200</math> Гц; t, с</p>

По результатам измерений (см. таблицу 2) были построены графики зависимостей, соответствующие значениям отклонения от круглости  $\Delta r$  в пределах заданного допуска 0,01 мм (рисунок 11).

При анализе диаграмм (см. таблицу 2) и графиков (см. рисунок 11) видно, что из 20-ти проведенных опытов максимальные смещения шпинделя при обработке поверхностей с подачей  $0,02 \div 0,10$  мм/об и в диапазоне частот вращения шпинделя 300–500 мин<sup>-1</sup> остаются в пределах допуска на отклонение от круглости, в области частот 500–600 мин<sup>-1</sup> и подач  $0,10 \div 0,15$  мм/об стремительно приближаются к предельному значению, а при  $n > 600$  мин<sup>-1</sup> и  $S > 0,15$  мм/об экстремально увеличиваются. Данное поведение поясняется, соответственно,

увеличением скорости резания  $V$ , сил резания, влиянием растущей центробежной силы и присутствием статического дисбаланса вала шпинделя<sup>10</sup>.

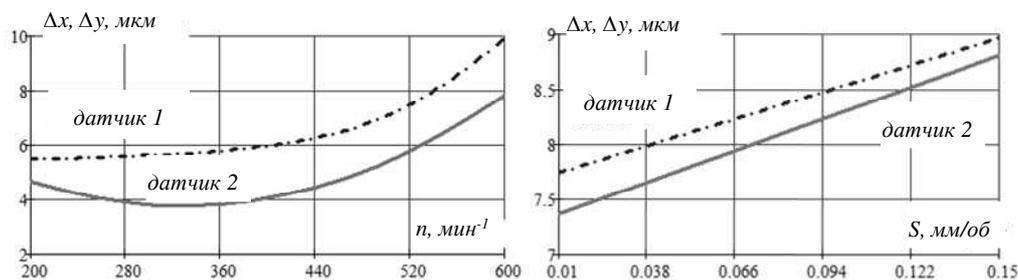


Рисунок 11. – Графики зависимостей биения  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  шпинделя от режимов резания  $n$  и  $S$

Для седел клапанов, обработанных в указанных диапазонах, было определены отклонения от круглости<sup>10</sup>, которые подверглись обработке с помощью программного обеспечения MathCad и Компас, и представлены в виде графиков зависимости  $\Delta r$  от режимов резания  $n$  и  $S$  (рисунок 12).

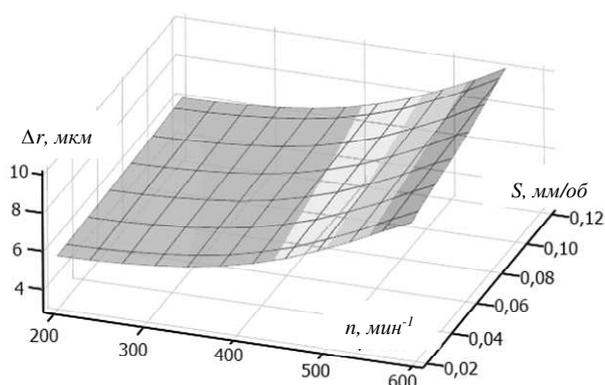


Рисунок 12. – Экспериментальная зависимость отклонения формы  $\Delta r$  обработанной поверхности от округлости от режимов резания  $n$  и  $S$

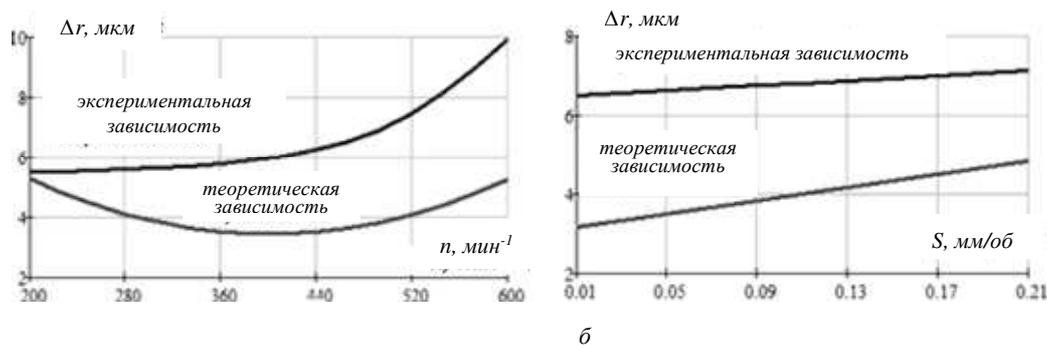


Рисунок 13. – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей отклонения формы  $\Delta r$  обработанной поверхности от округлости от частоты вращения шпинделя  $n$  (а), подачи шпинделя  $S$  (б)

С целью обеспечения требуемых результатов в пределах установленного допуска при контроле обработанных поверхностей седел диапазоны режимов обработки были скорректированы:  $n = 300\text{--}600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S = 0,02\text{--}0,12 \text{ мм/об}$ .

Адекватность полученных математическим моделированием зависимостей подтверждается сравнением экспериментальных результатов с теоретическими (см. рисунок 13). Расхождение между моделируемыми и практическими значениями находится в пределах от 10 до 20%.

<sup>10</sup> Веремей Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. – Чернигов, ЧНТУ, 2015. – 183 л.

Глубина резания в соответствии с выводами, полученными при планировании эксперимента, считается малозначимым переменным фактором, зависящим от степени износа седла и может быть принята максимальной ( $t_{\max} = 1$  мм) как постоянная величина в случае обработки новой заготовки (см. матрицу планирования эксперимента)<sup>11</sup>.

**Заключение.** Предложенная и экспериментально реализованная методика определения величины смещения шпинделя в плоскости ортогональной его оси вращения с помощью лазерных триангуляционных датчиков позволила исследовать и практически определить влияние режимов резания на погрешность формы при восстановлении седел клапанов.

Анализ найденных зависимостей в результате проведенного исследования позволяет сделать практические рекомендации для обеспечения значений отклонения от округлости седел клапанов в пределах 5,5–10 мкм: значения частоты вращения и подачи шпинделя должны составлять, соответственно, 300–600 мин<sup>-1</sup> и 0,02–0,15 мм/об. Глубина резания на отклонение от округлости практически не влияет в указанных выше диапазонах частот и подач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов Б.С., Артемьев В.А., Бойков Д.В., Комарова Г.А. Оценка герметичности впускного тракта двигателя по результатам анализа моторного масла // Двигателестроение. – 1991. – № 2(146). – С. 23–24.
2. Балюк Б.К., Божко А.Е. Надежность механизмов газораспределения быстроходных дизелей. – М.: Машиностроение, 1979. – 156 с.
3. Виноградов В.М. Технологические процессы ремонта автомобилей: учеб. пособие. – 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 384 с.
4. Ярошевич В.К., Савич А.С., Иванов В.П. Технология производства и ремонта автомобилей. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2011. – 591 с.
5. Веремей Г.А. Практические методы оценки износа седел клапанов в процессе дефектации // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 1(47). – С. 71–76.
6. Веремей Г.А. Усовершенствование оборудования для восстановительного ремонта седел клапанов в газораспределительных механизмах // Вестн. инженер. акад. Украины. – 2014. – № 2. – С. 37–41.

#### REFERENCES

1. Antropov, B.S., Artem'ev, V.A., Boikov, D.V. & Komarova, G.A. (1991). Otsenka germetichnosti vpusknogo trakta dvigatelya po rezul'tatam analiza motornogo masla [Evaluation of the engine inlet port tightness on motor oil analysis results]. *Dvigatelistroenie*, 2(146), 23–24. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Balyuk, B.K. & Bozhko, A.E. (1979). *Nadezhnost' mekhanizmov gazoraspredeleniya bystrokhodnykh dizelei*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
3. Vinogradov, V.M. (2009). *Tekhnologicheskie protsessy remonta avtomobilei: ucheb. posobie*. Moscow: Akademiya, 2009. (In Russ.)
4. Yaroshevich, V.K., Savich, A.S. & Ivanov, V.P. (2011). *Tekhnologiya proizvodstva i remonta avtomobilei*. Minsk: Adukat-syya i vykhavanne. (In Russ.)
5. Veremei, G.A. (2023). Prakticheskie metody otsenki iznosa sedel klapanov v protsesse defektatsii [Practical methods of the valve seats wear assessing in the flow deflection process]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 1(47), 71–76. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Veremei, G.A. (2014). Usovershenstvovanie oborudovaniya dlya vosstanovitel'nogo remonta sedel klapanov v gazoraspre-delitel'nykh mekhanizmax [Improvement of equipment for the restoration of valve seats in gas distribution mechanisms]. *Vestnik inzhenernoi akademii Ukrainy [Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine]*, (2), 37–41. (In Russ., abstr. in Ukrainian, in Engl.)

Поступила 05.01.2024

### METHODOLOGY FOR STUDYING ACCURACY PARAMETERS IN THE PROCESS OF RESTORING THE VALVE SEATS

G. VEREMEI

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*In this article a methodology for researching the parameters of forming in the process of processing valve seats of an internal combustion engine valve timing gear in an automobile repair industry was described.*

*The practical implementation of this methodology was carried out using laser triangulation sensors based on the developed device for boring valve seats. Experimental dependences of the cutting tool displacement on various processing modes were obtained. Practical recommendations were made on the selection of cutting mode ranges to ensure the required precision parameters when restoring valve seats.*

**Keywords:** valve seats, precision of processing, deviation from roundness, overhaul, laser triangulation sensors, precision parameters, worn valve seat surfaces, auto repair industry.

<sup>11</sup> Веремей Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. – Чернигов, ЧНТУ, 2015. – 183 л.

УДК 621.91.01

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-28-34

**ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ  
НА СТАНКЕ С ЧПУ****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Рассматривается повышение производительности обработки сложнопровильных поверхностей деталей и эффективности мощности приводов станка с ЧПУ путем использования концевых фрез с крутонаклонными режущими кромками. Приведены зависимости изменения сил резания от времени и режимов обработки фрезами различных фирм-производителей.*

**Ключевые слова:** *сложнопровильная поверхность, деталь, концевая фреза, сила резания, мощность привода, производительность, станок с ЧПУ.*

**Введение.** В современной технике широко применяются детали, форма которых включает сочетание различных поверхностей: цилиндрических, конических, сферических, винтовых, плоских и криволинейных, например, шаровые пальцы рычагов автомобилей, оси тяги ремизы, тройники запорной арматуры, корпуса с полостями, матрицы и пуансоны штампов, кулачки и эксцентрики механизмов автоматов и т.п. При механической обработке таких поверхностей деталей на станках с ЧПУ реализуются сложные кинематические схемы и траектории резания, переменные величины скоростей и подач заготовки и режущего инструмента. Стремление в этом случае повысить производительность обработки за счет увеличения значений скорости и подачи приводит к снижению потребляемой мощности приводов станка и неэффективной их загрузке. То есть требуется увеличить производительность обработки сложнопровильных поверхностей деталей при обеспечении максимально возможных значений потребляемой мощности приводов станков с ЧПУ и сохранении требуемой стойкости режущих инструментов.

Одним из путей решения этой задачи является использование вращающихся инструментов: концевых фрез, ротационных резцов и т.п., обеспечивающих касательное движение крутонаклонных режущих кромок<sup>1</sup>. Тенденция по все более широкому применению таких типов инструментов прослеживается в ряде ведущих зарубежных фирм, таких, например, как «SandvikCoromant» (Швеция), «Seco» (Япония), «Hertel» (Германия), «Guhring» (Германия), «Iscar» (Израиль), «TaeguTec» (Корея) и др.<sup>2</sup>. При этом не обосновывается, за счет каких кинематических, физических и технологических особенностей обеспечиваются преимущества касательного движения резания и режущих инструментов с крутонаклонными кромками. В ряде ранее проведенных исследований явлений, сопровождающих сложные виды обработки резанием, например, Г.И. Грановским [1], В.Ф. Бобровым [2], Е.Г. Коноваловым [3], П.И. Ящерицыным [4] и др. эти преимущества доказаны, но в основном для традиционно используемых в то время величин скоростей и мощностей приводов станков, возможностей реализации трех- и пятиосевой обработки на станках с ЧПУ, применения прогрессивных режущих инструментов, в т.ч. с износостойким покрытием и т.п. В настоящее время актуальным является исследование кинематических и физических характеристик скоростных видов обработки сложнопровильных поверхностей деталей на одном рабочем месте – станке с ЧПУ вращающимися режущими инструментами с касательным движением крутонаклонной режущей кромки [5; 6].

В данной работе рассматриваются результаты исследований силы резания концевыми фрезами с различными углами наклона режущей кромки.

**Основная часть.** Экспериментальные исследования сил резания проводились на вертикальном обрабатывающем центре FANUC Robodrilл серии a-D21LiB. Технические характеристики станка: частота вращения шпинделя – 10 000 мин<sup>-1</sup>, программируемая рабочая подача – 30 000 мм/мин, мощность главного двигателя – 7,5 кВт, размеры рабочей зоны – 700×400×330 мм. Форма заготовки – цилиндрическая, материал заготовки – сплав алюминия марки Д16Т. В качестве режущего инструмента использовались концевые фрезы различных фирм, наименование и геометрические параметры которых представлены в таблице 1.

Измерение сил резания производилось с использованием специального сконструированного и изготовленного в условиях научно-исследовательской лаборатории программно-измерительного комплекса (ПИК), включающего (рисунок 1): установочное приспособление фирмы System 3R (Швеция); усилители сигналов акселерометров фирмы Briel Kjaer (Дания); функциональные модули сбора данных для первичного преобразования и их оцифровки с акселерометра; тензометрический преобразователь фирмы National Instruments (США); шасси сбора данных для передачи уже оцифрованных данных на систему обработки и регистрация данных фирмы National Instruments (США); первичный тензометрический преобразователь. ПИК позволяет фиксировать силы резания в направлении осей X, Y, Z координатной системы станка.

<sup>1</sup> ГОСТ 25762. Обработка резанием. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.

<sup>2</sup> SECO. Каталог. Техническое руководство, 2020. – 435 с.

Таблица 1. – Наименование и геометрические параметры концевых фрез

Наименование фрезы	Радиус вершины (фаска), мм	Угол наклона главной режущей кромки лезвия фрезы $\lambda$ , град	Задний угол $\alpha$ , град	Угол наклона вспомогательной режущей кромки $\lambda_1$ , град	Количество зубьев
USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65	0,5	30	$9^\circ \pm 5'$	$1^\circ \pm 10'$	4
SECO JS514100D2C.0Z4-NXT 5115144-059	(0,1)	46	$9^\circ \pm 10'$	$3^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #19978 10 WN R-N	(0,1)	30	$9^\circ 30' \pm 5'$	$1^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #6765 10 WN R-RF1	(0,2)	48	$10^\circ \pm 10'$	$2^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #19964 10WNR-HRF (шаг зубьев 1 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	(0,1)	20	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4
Guhring #5504 12R-NRF (шаг зубьев 1,3 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	(0,5)	30	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4



1 – установочное приспособление; 2 – усилители сигналов акселерометров; 3 – функциональные модули сбора данных; 4 – шасси сбора данных; 5 – первичный тензометрический преобразователь

Рисунок 1. – Программно-измерительный комплекс

Заготовка диаметром  $D$  размещается в установочном приспособлении ПИК (рисунок 2) и имеет возможность вместе поступательно перемещаться вдоль осей  $X$  или  $Y$  в движении подачи  $D_s$ . Фрезу установили в шпинделе станка по оси  $Z$  на глубину врезания  $A$  и глубину резания  $t$  (ширину фрезерования  $b$ ) с возможностью главного вращательного движения  $D_r$ .

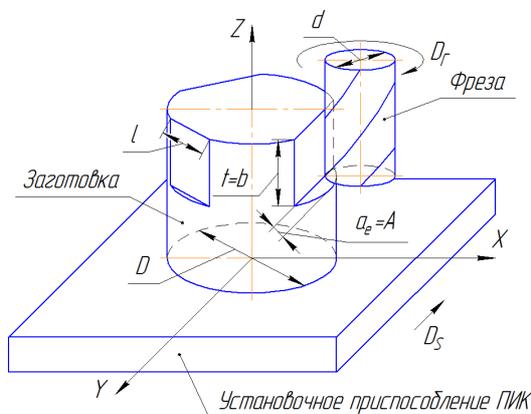


Рисунок 2. – Схема проведения эксперимента

В ходе эксперимента производилась последовательная обработка плоской поверхности сегмента заготовки длиной  $l$  (рисунок 3).

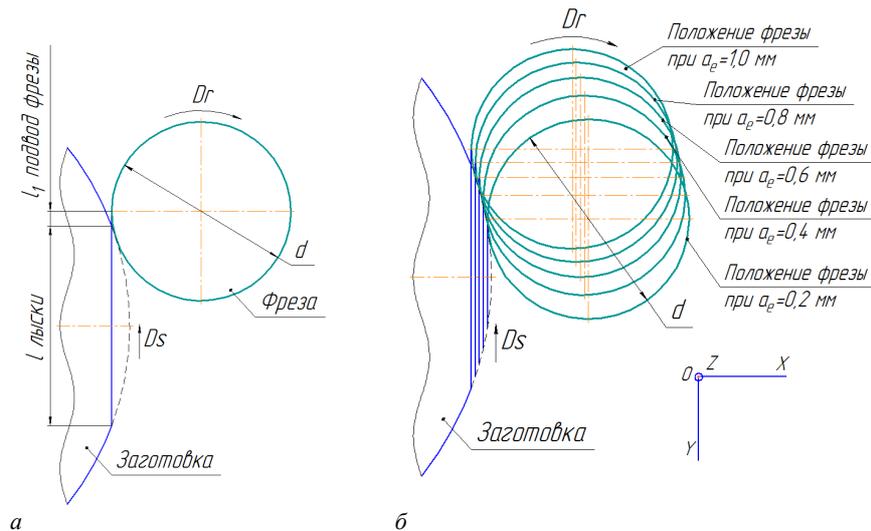


Рисунок 3. – Схема обработки лыски заготовки (а) и начальные положения фрезы при срезании слоя толщиной  $a_{ei}$  (б)

На каждый последующий проход фрезы в движении подачи  $Ds$  заготовка поворачивалась на очередной обрабатываемый сегмент длиной  $l$  лыски, при этом учитываются увеличивающиеся длины контакта подвода фрезы  $l_1$  и глубины резания  $a_e$  от 0,2 до 1,0 мм. В ПИКе предусмотрено дополнительное вращательное движение заготовки вокруг собственной оси. Таким образом, технические возможности станка и ПИК позволяют реализовать обработку плоских, цилиндрических и криволинейных поверхностей детали вращающейся фрезой с врезанием по касательной к обрабатываемой поверхности заготовки.

При обработке заготовок выбирались рекомендуемые<sup>3,4</sup> элементы режима резания  $v$ ,  $S$ ,  $t$  (таблица 2) и согласовывались с техническими характеристиками станка (таблица 3).

Таблица 2. – Рекомендуемые значения элементов режима резания

Наименование фрезы	Скорость резания $v$ , м/мин	Глубина резания $a_e$ , мм	Ширина врезания $a_p$ , мм	Подача на зуб $f_z$ , мм/зуб	Обрабатываемый материал
USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65	140–250	$=0,1D$	$=1D$	0,03–0,08	сталь
SECO JS514100D2C.0Z4-NXT 5115144-059	500 (400–600)	$=0,3D$	$=1D$	0,090	алюминий
	205 (175–235)			0,095	сталь
Guhring #19978 10 WN R-N	180–220	$=0,1D$	$=1D$	0,059	алюминий
	306–374			0,065	
	373–457			0,059	сталь
	157–193			0,053–0,059	
Guhring #6765 10 WN R-RF1	340	$=0,1D$	$=0,8D$	0,138	сталь
	360	$=0,02D$		0,066	
Guhring #19964 10WNR-HRF (шаг зубьев 1 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	72–88	$=(0,5 \times 1)D$	$=1D$	0,018	сталь алюминий
	87–143			0,025–0,030	
Guhring #5504 12R-NRF (шаг зубьев 1,3 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	97–119	$=(0,5 \times 1)D$	$=1D$	0,036–0,046	сталь алюминий
	87–143			0,046–0,048	

Таблица 3. – Элементы режима резания, согласованные с техническими характеристиками станка

При диаметре фрезы $d = 10$ мм					
Количество зубьев $z = 4$					
Подача на зуб $f_z$ , мм/зуб	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Минутная подача $f_m$ , мм/мин	572,96	891,27	1273,24	1718,87	2228,17
Глубина врезания $a_e$ , мм	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Скорость резания $v$ , м/мин	150	175	200	225	250
Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>	4774,65	5570,42	6366,2	7161,97	7957,75

<sup>3</sup> Каталог инструментов GuhringSuperLine, 2016. – 150 с.

<sup>4</sup> Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.

Окончание таблицы 3

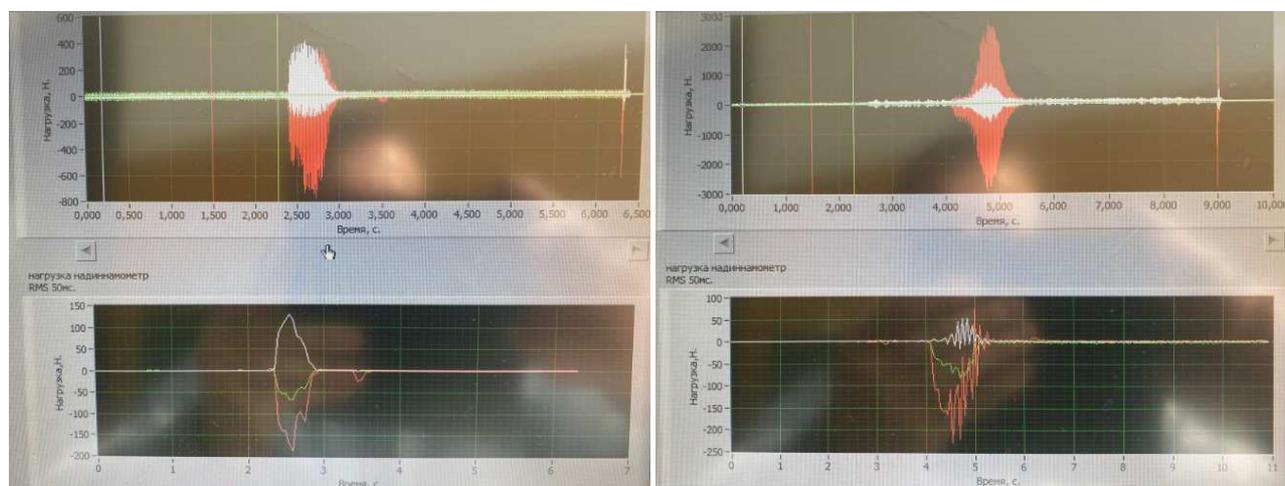
При диаметре фрезы $d = 12$ мм					
Количество зубьев $z = 4$					
Подача на зуб $f_z$ , мм/зуб	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Минутная подача $f_m$ , мм/мин	477,47	742,72	1061,03	1432,4	1856,81
Глубина врезания $a_e$ , мм	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Скорость резания $v$ , м/мин	150	175	200	225	250
Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>	3978,87	4642,02	5305,17	5968,31	6631,46

Последовательность изменения элементов режима резания в опытах составляется таким образом, чтобы учесть особенности как одно-, так и трехфакторного экспериментов (таблица 4).

Таблица 4. – Значения элементов режима резания в опытах эксперимента

№ опыта	Глубина врезания $a_e$ , мм	Подача на зуб $f_z$ , мм/зуб	Минутная подача $f_m$ , мм/мин	Скорость резания $v$ , м/мин	Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>
1	0,2	0,07	2230	250	7960
2	0,4	0,07	2230	250	7960
3	0,6	0,07	2230	250	7960
4	0,8	0,07	2230	250	7960
5	1	0,07	2230	250	7960
6	1	0,03	955	250	7960
7	1	0,04	1274	250	7960
8	1	0,05	1592	250	7960
9	1	0,06	1910	250	7960
10	1	0,07	2230	250	7960
11	1	0,07	1337	150	4775
12	1	0,07	1560	175	5570
13	1	0,07	1782	200	6366
14	1	0,07	2005	225	7162
15	1	0,07	2230	250	7960
16	0,2	0,03	955	250	7960
17	0,2	0,07	1337	150	4775
18	1	0,03	573	150	4775
19	0,2	0,03	573	150	4775

На рисунке 4 показаны фрагменты осциллограмм с дисплея ПИК амплитудных изменений составляющих силы резания в течение времени подвода фрезы и обработки лыски (сегмента) невращающихся и вращающихся заготовок при глубине врезания  $a_e = 1,0$  мм, ширине резания  $a_p = 1,0$  мм, минутной подаче  $f_m = 1300$  мм/мин, частоте вращения шпинделя  $n = 6400$  мин<sup>-1</sup>. Осциллограммы позволяют установить изменения значений составляющих силы резания при входе и выходе фрезы в зону резания и значения силы резания по длине обработки сегмента заготовки.



а

б

Рисунок 4. – Фрагменты осциллограмм амплитудных изменений составляющих силы резания при обработке невращающейся (а) и вращающейся (б) заготовок при встречном фрезеровании

Время фиксации силы резания на дисплее сопоставляется со временем обработки лыски (таблица 5). При обработке каждого последующего сегмента возрастает время обработки  $\tau$  от 0,2 до 1,5 с, длина лыски  $l$  от 5 до 11 мм и глубина врезания  $a_e$  от 0,2 до 1,0 мм.

Таблица 5. – Расчетное время обработки лыски

№ опыта	Длина лыски $l$ , мм	Длина подвод фрезы $l_1$ , мм	Время обработки $\tau$ , с	№ опыта	Длина лыски $l$ , мм	Длина подвод фрезы $l_1$ , мм	Время обработки $\tau$ , с
1	5,0438	0,4347	0,17711	11	11,1355	0,9899	0,65307
2	7,1106	0,6188	0,24987	12	11,1355	0,9899	0,55963
3	8,681	0,7627	0,30529	13	11,1355	0,9899	0,48992
4	9,992	0,8825	0,35155	14	11,1355	0,9899	0,43512
5	11,1355	0,9899	0,39198	15	11,1355	0,9899	0,39198
6	11,1355	0,9899	0,91397	16	5,0438	0,4347	0,41295
7	11,1355	0,9899	0,68570	17	5,0438	0,4347	0,29507
8	11,1355	0,9899	0,54866	18	11,1355	0,9899	1,52202
9	11,1355	0,9899	0,45727	19	5,0438	0,4347	0,68768
10	11,1355	0,9899	0,39198				

Полученные осциллограммы обрабатываются соответствующим образом (пересчитываются) по максимальным и минимальным пикам изменения силы резания и приводятся к виду, фрагментарно представленному на рисунке 5. В данном случае количество записанных блоков данных характеризует чувствительность применяемой регистрирующей аппаратуры, которая позволяет фиксировать 25 000 сигналов в 1 с (1 с соответствует 20 блокам).

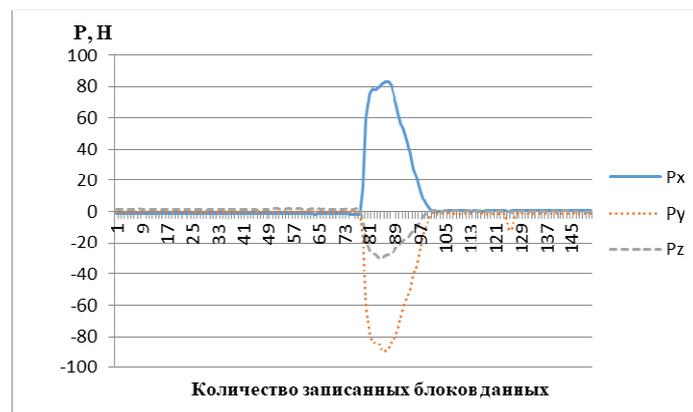


Рисунок 5. – Фрагмент обработанной осциллограммы

По результатам эксперимента строятся зависимости изменения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от глубины резания, подачи на зуб и скорости резания для различных фрез и значений угла наклона режущей кромки. Фрагменты графиков показаны на рисунке 6.

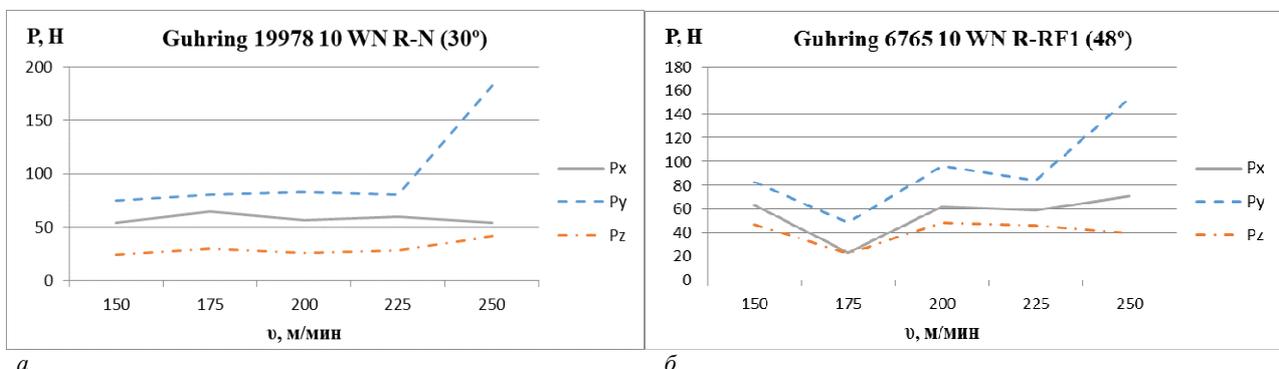
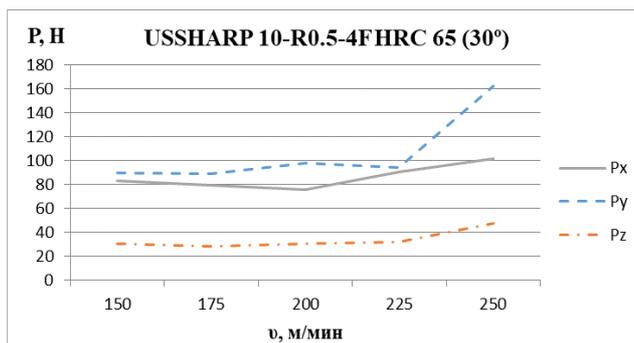


Рисунок 6. – Зависимости изменения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от скорости резания при обработке фрезами Guhring 19978 10 WN R-N (30°) (а), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (б), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (в) (начало)

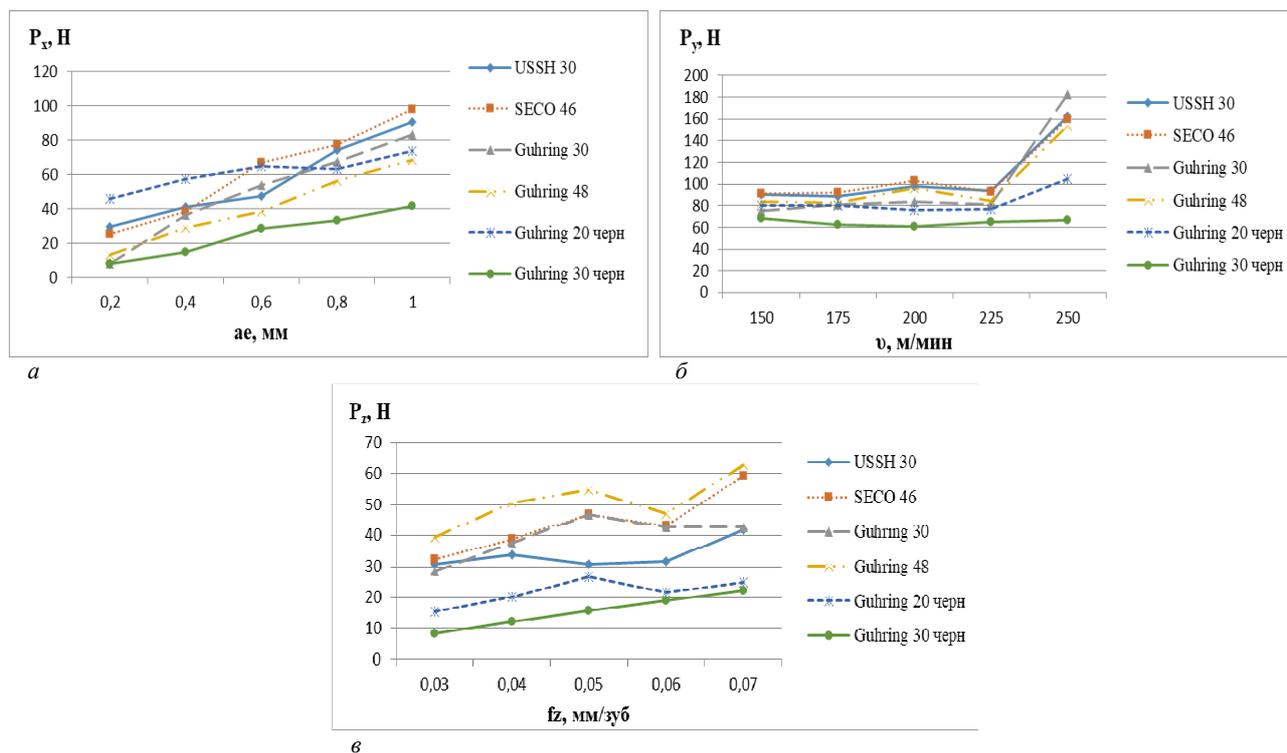


б

Рисунок 6. – Зависимости изменения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от скорости резания при обработке фрезами Guhring 19978 10 WN R-N (30°) (а), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (б), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (в) (окончание, начало – с. 32)

Как видно из графиков, с увеличением значений скорости резания от 150 до 250 м/мин составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_z$  изменяются незначительно, а значения  $P_y$  в диапазоне 225–250 м/мин резко возрастают, что объясняется, по-видимому, образованием наплыва на передней поверхности лезвия в выбранном диапазоне скорости резания, который увеличивает отрицательные значения переднего угла и, следовательно, составляющие силы резания  $P_y$ .

Сопоставление значений составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  для различных фрез и при изменении элементов режима резания представлено на рисунке 7.



а

б

в

Рисунок 7. – Зависимости изменения составляющих  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  силы резания для различных фрез от глубины врезания  $a_e$  (а), скорости резания  $v$  (б) и подачи на зуб  $f_z$  (в)

Наибольшее влияние на составляющие  $P_x$  и  $P_z$  оказывает увеличение значений  $a_e$  и  $f_z$  (см. рисунок 7), причем уменьшение длины режущей кромки (фрезы Guhring #19964 10WNR-HRF (20°) и Guhring #5504 12R-NRF (30°)) приводит к наименьшим значениям  $P_x$  и  $P_z$ . Увеличение скорости резания  $v$  до 225 м/мин практически не влияет на изменения составляющей силы резания  $P_y$ . При значении  $v$  более 225 м/мин значения составляющей силы резания  $P_y$  резко возрастает.

**Закключение.** Согласно результатам проведенных исследований, при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия фрезы  $\lambda^\circ$  с 30° до 48° происходит снижение составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  на

17–24% при обработке лыски неподвижной заготовки. При обработке вращающейся заготовки в попутном фрезеровании происходит снижение амплитудных значений составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  до 3 раз по сравнению с неподвижной заготовкой, а при встречном фрезеровании, наоборот, амплитудные значения увеличиваются с 400 до 3000 Н. При обработке неподвижной заготовки фрезой с прерывистой режущей кромкой происходит снижение составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  до 2 раз, а при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия  $\lambda^\circ$  этой фрезы с 20 до 30° составляющие силы резания уменьшаются до 2,5–3 раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 199 с.
2. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.
3. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Минск: Наука и техника, 1972. – 272 с.
4. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицин, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин и др. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229 с.
5. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 11. – С. 31–38.
6. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2020. – № 3. – С. 28–34.

## REFERENCES

1. Granovskii, G.I. (1948). *Kinematika rezaniya*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.)
2. Bobrov, V.F. (1962). *Vliyaniye ugla naklona glavnoi rezhushchei kromki instrumenta na protsess rezaniya metallov*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.)
3. Konovalev, E.G., Sidorenko, V.A. & Sous', A.V. (1972). *Progressivnye skhemy rotatsionnogo rezaniya metallov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.)
4. Yashcheritsin, P.I., Borisenko, A.V., Drivotin, I.G. & Lebedev, V.Ya. (1987). *Rotatsionnoe rezanie materialov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.)
5. Popok, N.N. & Anisimov, V.S. (2019). Kinematika obrabotki poverkhnostei detalei vrashchayushchimsya rezhushchim instrumentom s kasatel'nym dvizheniem rezhushchei kromki [Kinematics of processing surfaces of parts with a rotating cutting tool with tangential movement of the cutting edge]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 11, 31–38. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Popok, N.N. & Anisimov, V.S. (2020). Deformatsiya i struzhkoobrazovanie pri obrabotke ploskikh i krivolineinykh poverkhnostei detalei vrashchayushchimsya re-zhushchim instrumentom na tokarnykh i frezernykh stankakh s ChPU [Deformation and chip formation when processing flat and curved surfaces of parts with a rotating cutting tool on cnc lathes and milling machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 3, 28–34. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 26.01.2024

## DYNAMICS OF MECHANICAL MACHINING WITH END MILLS ON CNC MACHINE

**N. POPOK, V. ANISIMOV**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Increasing the productivity of processing complex-profile surfaces of parts is considered and power efficiency of CNC machine drives by using end mills with steep cutting edges. Dependences of changes in cutting forces on time and processing modes using milling cutters from various manufacturers are given.*

**Keywords:** complex surface, part, end mill, cutting force, drive power, productivity, CNC machine.

УДК 621.91.01/02:793(075.8)

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-35-44

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ И ОХЛАЖДАЮЩИМИ ПОТОКАМИ ПРИ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕПОЛНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

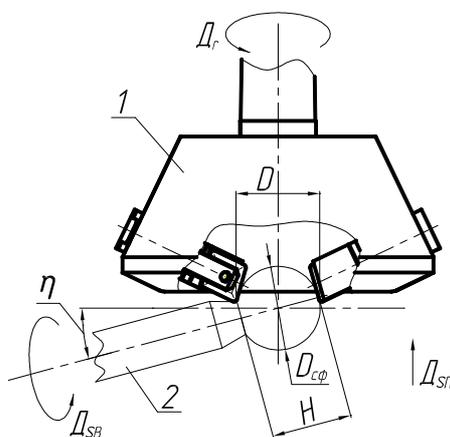
*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК,  
канд. техн. наук Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, канд. техн. наук С.А. ПОРТЯНКО  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Рассмотрена комбинированная скоростная обработка неполных сферических поверхностей деталей. Выведены формулы для расчета температуры резания с учетом угла контакта инструмента с заготовкой. Приведены результаты экспериментальных исследований температур детали и стружки в зависимости от времени обработки, а также моделирования охлаждающих воздушных потоков в инструменте и зоне резания.*

**Ключевые слова:** температура, тепловой поток, неполная сферическая поверхность, скоростная обработка, многолезвийный режущий инструмент.

**Введение.** При механической обработке поверхностей деталей в зонах упругого и пластического деформирования срезаемого слоя и трения контактных площадок лезвия инструмента со стружкой выделяется большое количество теплоты. Тепловые потоки направлены в стружку, деталь, инструмент и окружающую среду, и их распределение по величине зависит от режимов резания, свойств обрабатываемого и инструментального материалов, охлаждения и других условий. Регулирование тепловых потоков по направлению и величине при резании имеет большое значение, т.к. позволяет нагрев детали и повысить ее качество и точность. Особенно актуально решение этой задачи для скоростной лезвийной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей, осуществляемой при значениях скорости резания выше принятых традиционно<sup>1</sup>. Предлагается комбинированная скоростная обработка неполных сферических поверхностей деталей, для которых необходимы исследования выделяемой в зоне резания теплоты, температуры детали и стружки, что позволит предложить эффективный способ охлаждения и снижения нагрева детали.

**Основная часть.** Схема комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей детали представлена на рисунке 1 [1].



**Рисунок 1. – Схема комбинированной скоростной обработки  
неполной сферической поверхности детали**

Согласно схеме режущий инструмент 1 совершает главное вращательное движение  $D_r$ , а заготовка 2 диаметром  $D_{сф}$  – вращательное движение подачи  $D_{св}$ . Заготовке также сообщается поступательное движение  $D_{ст}$ , которое обеспечивает врезание на заданную глубину резания. При этом режущие лезвия инструмента 1 настраиваются на диаметр  $D$ , а заготовка 2 устанавливается относительно инструмента под углом  $\eta$  к оси вращения. Оси вращения заготовки и инструмента пересекаются. Схема установки гарантирует получение неполной сферической поверхности высотой  $H$ . Высокое качество обработанной поверхности обеспечивается последовательной реализацией процессов врезания и выхаживания. Кинематическая схема при врезании вращающегося инстру-

<sup>1</sup> Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. – URL: <http://insoftmach.ru/HSC.html>

мента во вращающуюся заготовку – трехэлементная ( $D_r, D_{sv}, D_{сп}$ ), а при выхаживании, когда поступательное движение  $D_{сп}$  отключается, переходит в двухэлементную ( $D_r, D_{sv}$ ). Сложная траектория резания реализуется в виде циклоиды, накрутой на окружность сферы по спирали.

Режимы резания при обработке поверхности детали из конструкционной углеродистой стали: частота вращения инструмента – 3000–12 000 мин<sup>-1</sup>, частота вращения детали – 10–200 мин<sup>-1</sup>;

Для теоретических исследований тепловых явлений использовались известные математические формулы [2] для расчета температуры в цилиндрических и сферических телах, т.к. заготовка в рассматриваемом случае имеет форму цилиндра, а готовая деталь – форму сферы.

Для цилиндра:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + \varphi \frac{\partial \Theta}{\partial \mu}. \quad (1)$$

Для сферы:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где  $\Theta$  – температура;

$t$  – время;

$k$  – коэффициент теплопроводности;

$r, \mu, z, \varphi$  – координаты.

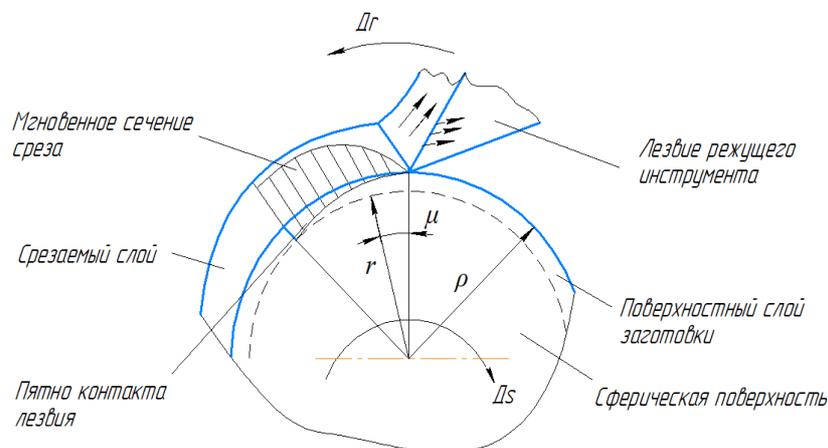
Примем, что источник теплоты является быстродвижущимся, поскольку скорость вращения фрезы достигает 10 м/с и критерий Пекле  $Pe > 10$ :

$$Pe = 10 \frac{v \cdot l_n}{k}, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость резания;

$l_n$  – размер контактной площадки.

Исходная схематизация источника теплоты предложена в работе [3] и с учетом особенностей комбинированной обработки представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Схема источника теплоты при комбинированной обработке сферической поверхности**

Через площадки контакта в форме «запятая» тепловые потоки из зоны резания направляются в заготовку, стружку и лезвие инструмента. Длина контакта определяется по эмпирической формуле

$$l_n = l \cdot \sin^{\alpha l} \mu, \quad (4)$$

где  $\mu$  – угол контакта;

$l$  – коэффициент, представляющий среднее значение длины контакта при  $\mu = 90^\circ$ ,

$$l = \frac{c_l \cdot S^{y_l}}{\left( \frac{v_\phi}{v_d} \right)^{z_l}},$$

где  $S$  – подача;

- $v_{\phi}$  – линейная скорость фрезы;
- $v_d$  – линейная скорость детали;
- $c_l$  – поправочный коэффициент;
- $y_l, z_l$  – показатели степеней.

Температура от точечного источника теплоты, согласно [4], описывается следующим уравнением:

$$\Theta_{p,s,2}(r, \mu, \tau) = \frac{q_{p,s,2} \exp\left[-\frac{z^2}{4k(\tau - \tau_s)}\right]}{\pi \cdot R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot k \cdot (\tau - \tau_s)}} \cdot \left[ 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos n(\mu - \mu_s) \cdot \sum_a \frac{\exp[-k \cdot a^2 \cdot (\tau - \tau_s)] \cdot a^2 \cdot \ln(ar) \cdot \ln(ar_s)}{\left(a^2 - \frac{n^2}{R^2}\right) \cdot \ln^2(aR)} \right], \quad (5)$$

где  $r, \mu$  – координаты точки в цилиндрической системе координат;

$r_s, \mu_s$  – координаты источника теплоты;

$\tau$  – текущее время;

$\tau_s$  – время действия источника теплоты;

$q_{p,s,2}$  – интенсивность точечного источника теплоты;

$k$  – коэффициент температуропроводности тела;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности тела;

$\ln(x)$  – функция Бесселя  $n$ -го порядка первого рода от действительного аргумента;

$\sum_a$  – суммы положительных корней характеристического уравнения  $a^2 \cdot \ln(aR) = 0$ ;

$n$  – порядок суммирования ( $n = 0, 1, 2 \dots$ ).

Начальные условия

$$0 \leq \mu \leq 2\pi; 0 \leq r \leq R, \tau > 0; \tau \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r} \Big|_{R=0}^{r=0} = 0. \quad (7)$$

Формула для расчета температуры в заготовке при воздействии источника температуры в форме «запятая» имеет следующий вид:

$$\Theta_{s,2} = \frac{q_{s,2} \exp\left[-\frac{z^2}{4k(\tau - \tau_s)}\right]}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\tau - \tau_s}} \cdot \left[ l \cdot \sin^{xl} \mu \left( R - \frac{1}{2} \cdot \sin^{xl} \mu \right) + 2 \sum_a \frac{\exp[-k \cdot a^2 (\tau - \tau_s)] \cdot I_0(a \cdot R)}{I_0(a \cdot R)} \cdot \int_{R-l \cdot \sin^{xl} \mu}^R r_s \cdot l_0(a \cdot r) \cdot dr_s \right]. \quad (8)$$

Если источник действует в течение времени от 0 до  $\tau_s$ , то формула (8) приводится к виду

$$\Theta_{s,2}(r, z, \tau) = \frac{2q_{s,2}}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{n \cdot k_s}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{xl} \mu \cdot (2R - l \cdot \sin^{xl} \mu) \cdot \left[ 2\sqrt{\tau} \cdot \exp\left(\frac{z^2}{4k\tau}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{k \cdot \tau}}\right) \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \sum_a \frac{\exp(-a^2 \cdot r) \cdot I_0(a \cdot r)}{a \cdot I_0^2(a \cdot R)} \cdot \int_{R-l \cdot \sin^{xl} \mu}^R r_s \cdot l_0(a \cdot r_s) \cdot \int_0^{a\sqrt{k_s}} \exp\left[-\left(\frac{za}{2x} - x\right)^2\right] dx \right\}. \quad (9)$$

При длительном воздействии источника ( $\tau \rightarrow \infty$ ) формула (8) примет вид:

$$\Theta_{s,2}(r, \mu, \tau) = \frac{2q_{s,2}}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{n \cdot k}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{xl} \mu \cdot (2R - l \cdot \sin^{xl} \mu) \cdot \left[ 2\sqrt{\tau} \cdot \exp\left(\frac{z^2}{4k\tau}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \sum_a \frac{e^{-a^2 \cdot r} \cdot I_0(a \cdot r)}{a \cdot I_0^2(a \cdot R)} \cdot \left\{ \frac{R}{a} I_1(aR) - \frac{R - l \sin^{xl} \mu}{a} \cdot I_1[a \cdot R - l \sin^{xl} \mu] \right\} \right\}. \quad (10)$$

По формуле (10) были рассчитаны значения температуры резания  $\theta$  при различных углах контакта инструмента с заготовкой  $\mu$ . Фрагмент результатов расчета приведен на рисунке 3 в виде графика. Согласно графику с ростом угла контакта с  $10^\circ$  до  $20^\circ$  температура в зоне резания возрастает от  $450^\circ \text{C}$  до  $750^\circ \text{C}$ , что объясняется ростом нагрузки и мощности резания.

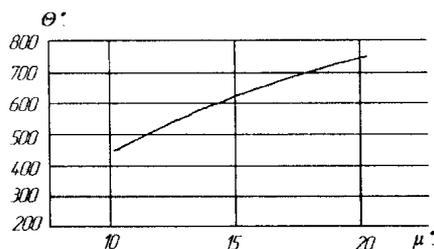


Рисунок 3. – Зависимость температуры резания  $\theta$  от угла контакта  $\mu$

Для проверки результатов расчета и определения нагрева стружки и детали были проведены экспериментальные исследования.

При определении температуры стружки методом калориметрирования установлено, что на этапе врезания при обработке острозаточенным инструментом с частотой вращения  $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$  и частотой вращения заготовки  $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$  ее значения находятся в пределах 410–460 °С [5]. При превышении допустимых значений износа лезвий (выше 0,4 мм) температура начинает резко увеличиваться. При частоте вращения инструмента 12 000  $\text{мин}^{-1}$  температура резко повышается вплоть до температуры плавления обрабатываемого материала, и стружка формируется в виде капель (рисунок 4).

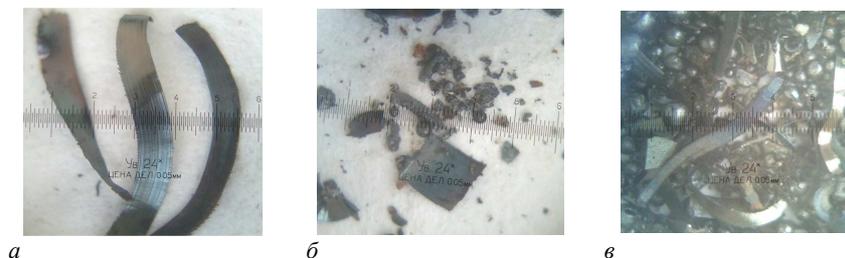
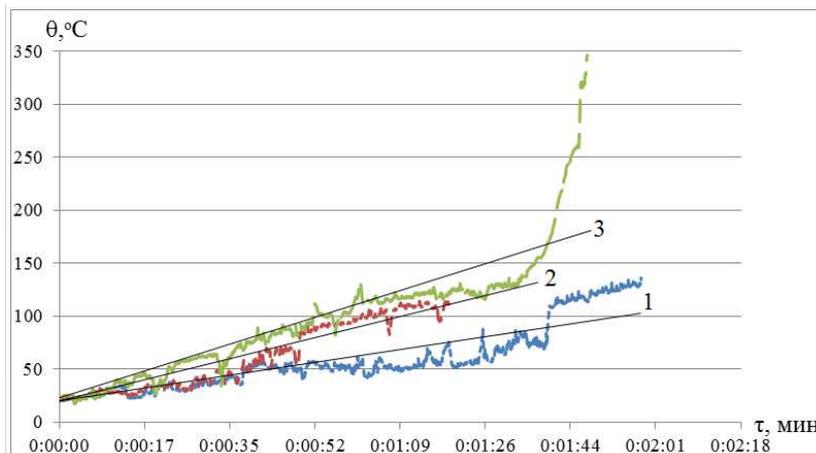


Рисунок 4. – Формы стружки на этапе врезания (а), выхаживания (б), при работе затупленным инструментом с  $n_1 = 12\,000 \text{ мин}^{-1}$  (в)

При помощи пирометра «Optris LS» определялось влияние режимов резания на температуру обработанной неполной сферической поверхности детали. В результате экспериментов установлено, что в зависимости от частот вращения инструмента и заготовки и их диаметров температура поверхности изменяется от 30 до 120 °С. Изменение температуры поверхности детали при последовательной обработке трех заготовок диаметром 35 мм одним инструментом с частотой вращения 6300  $\text{мин}^{-1}$  и разными поперечными подачами представлено на рисунке 5.



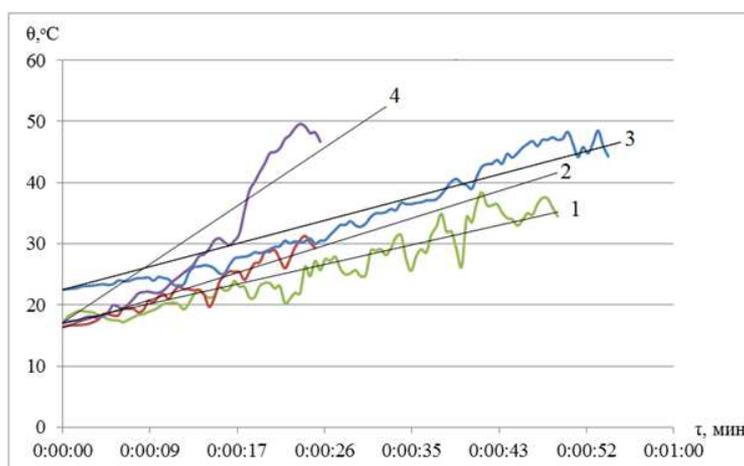
1 – заготовка 1, поперечная подача  $S_n = 0,508 \text{ мм/мин}$ ; 2 – заготовка 2, поперечная подача  $S_n = 0,759 \text{ мм/мин}$ ; 3 – заготовка 3, поперечная подача  $S_n = 0,612 \text{ мм/мин}$

Рисунок 5. – Зависимости изменения температуры поверхности детали диаметром 35 мм от времени обработки с частотой вращения инструмента 6300  $\text{мин}^{-1}$  и частотой вращения заготовки  $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$

По мере затупления режущих кромок лезвия инструмента интенсивность накопления температуры в поверхности детали возрастает с 0,98 до 1,37 °C/c (см. рисунок 5). Нагрев поверхности детали до 160 °C свидетельствует о том, что по мере увеличения размеров фаски износа на задней поверхности лезвия инструмента тепловые потоки, направленные в инструмент и деталь, увеличиваются. При этом влияние поперечной подачи (глубины резания или ширины сечения срезаемого слоя) как фактора, улучшающего теплоотвод в стружку, снижается. При достижении величины высоты и длины фаски износа более 0,4 и 4 мм соответственно наблюдается резкое увеличение температуры до 300–400 °C за короткий промежуток времени (10–15 с) и катастрофический износ лезвия инструмента.

Отсюда можно сделать вывод, что чем больше частота вращения и диаметр инструмента, а следовательно, и скорость резания, тем выше значения температуры и интенсивность нагрева поверхности детали. Интенсивность накопления теплоты в поверхности детали зависит от величины поперечной подачи и износа лезвия.

Обработка неполных сферических поверхностей деталей диаметром 35 мм на разных частотах вращения инструмента и поперечных подачах при частоте вращения заготовки 200 мин<sup>-1</sup> приводит к росту температуры до 50 °C (рисунок 6). На графиках видно, что при частоте вращения инструмента 12 000 мин<sup>-1</sup> интенсивность накопления теплоты в поверхности детали резко возрастает. Эти графики подтверждают возможность регулирования интенсивности тепловыделения за счет изменения частоты вращения инструмента, поперечной подачи и износа лезвия. Так, увеличение частоты вращения инструмента с 3150 мин<sup>-1</sup> до 9 000 мин<sup>-1</sup> при изменении поперечной подачи с 1,61 мм/мин до 2,25 мм/мин и 0,853 мм/мин, а также увеличение износа лезвия практически не изменяют интенсивность тепловыделения.



1 –  $n_1 = 3150$  мин<sup>-1</sup> и  $S_n = 1,61$  мм/мин; 2 –  $n_1 = 6300$  мин<sup>-1</sup> и  $S_n = 2,25$  мм/мин;  
3 –  $n_1 = 9000$  мин<sup>-1</sup> и  $S_n = 0,853$  мм/мин; 4 –  $n_1 = 12 000$  мин<sup>-1</sup> и  $S_n = 1,543$  мм/мин

Рисунок 6. – Зависимости изменения температуры поверхности детали диаметром 35 мм от времени обработки с частотой вращения заготовки  $n_2 = 200$  мин<sup>-1</sup>

Как показали результаты исследований, путем изменения значений частот вращения инструмента и заготовки можно регулировать величину и интенсивность теплопередачи.

Для более эффективного охлаждения зоны резания предлагается модернизация конструкции инструмента, заключающаяся в изготовлении отверстий (каналов) в корпусе, через которые воздух, захватываемый из окружающей среды, подается в закрытую полость корпуса инструмента и зону резания. Данная модернизация позволяет улучшить отвод стружки из зоны резания и, как следствие, снизить нагрев обработанной поверхности детали.

Для моделирования процесса охлаждения рассмотрим корпус режущего инструмента (рисунок 7), в котором выполнены каналы цилиндрической и конической форм диаметром 8–14 мм.

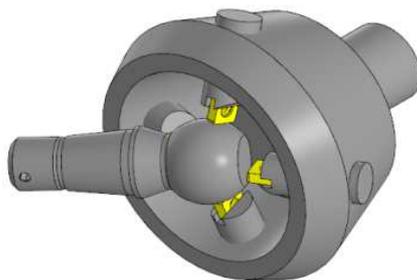


Рисунок 7. – Моделирование обработки неполных сферических поверхностей деталей

Примем поток воздуха несжимаемым. Тогда, используя уравнение Бернулли для несжимаемой среды, рассчитаем объем потока воздуха:

$$Q = A v_n, \quad (11)$$

где  $A = \pi r^2$  – площадь сечения канала;  
 $r$  – радиус канала;  
 $v_n$  – скорость потока воздуха.

Скорость потока воздуха может быть рассчитана с использованием принципа сохранения энергии между точками входа и выхода потока, а также учетом таких факторов, как разница давлений, потери энергии из-за трения и др., специфичных для конкретного способа охлаждения.

Скорость потока воздуха, захватываемого из окружающей среды вращающимся инструментом, рассчитывается по формуле

$$v_n = \frac{2\pi \cdot r n}{t}, \quad (12)$$

где  $n$  – частота вращения инструмента.

Зависимости изменения скорости и производительности подачи объема потока от размера радиуса канала представлены на графиках (рисунки 8 и 9).

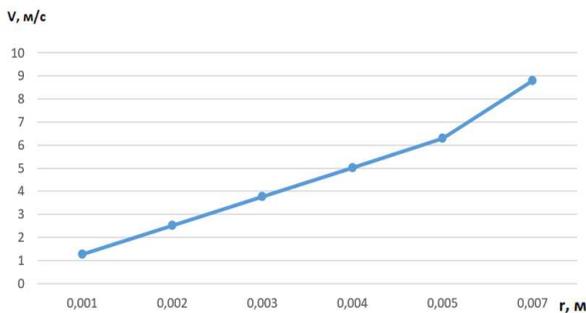


Рисунок 8. – Зависимость скорости потока воздуха от размера радиуса канала

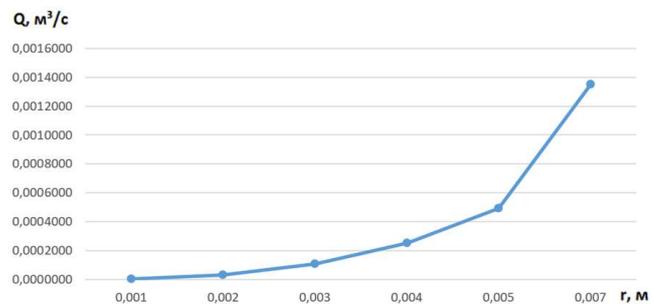


Рисунок 9. – Зависимость производительности подачи объема потока воздуха от размера радиуса канала

Так, при канале диаметром 10 мм производительность подачи объема потока воздуха, захватываемого каналом при вращении инструмента, составляет приблизительно 0,0005 м³/с.

Для расчета потока воздуха в коническом канале воспользуемся уравнением непрерывности, согласно которому производительность подачи объемного потока воздуха должна оставаться постоянной вдоль всего канала:

$$Q_1 = Q_2, \quad (13)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – производительность подачи объемного потока воздуха на входе и выходе канала.

Поскольку площадь сечения изменяется вдоль конического канала, то можем выразить производительность подачи объемного потока через площади сечений и скорости потока воздуха:

$$A_1 v_{n1} = A_2 v_{n2}, \quad (14)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – площади сечений на входе и выходе канала;  
 $v_{n1}$  и  $v_{n2}$  – скорости потока воздуха на входе и выходе канала.

Если известны площадь сечения и скорость потока воздуха на входе канала, то можно найти скорость потока воздуха на выходе канала:

$$v_{n2} = \frac{A_1 v_{n1}}{A_2}. \quad (15)$$

Таким образом, зная площадь сечения и скорость потока воздуха на входе канала, а также соответствующие значения на выходе, можно рассчитать скорость выходящего потока воздуха из конического канала. Графики изменения скорости и производительности подачи объема потока воздуха, проходящего через конический канал с радиусом 4 мм на выходе, от размера радиуса на входе представлены на рисунке 10.

Зависимости изменения скоростей потока воздуха на входе  $v_{n1}$  и выходе  $v_{n2}$  канала представлены на графике (рисунок 11).

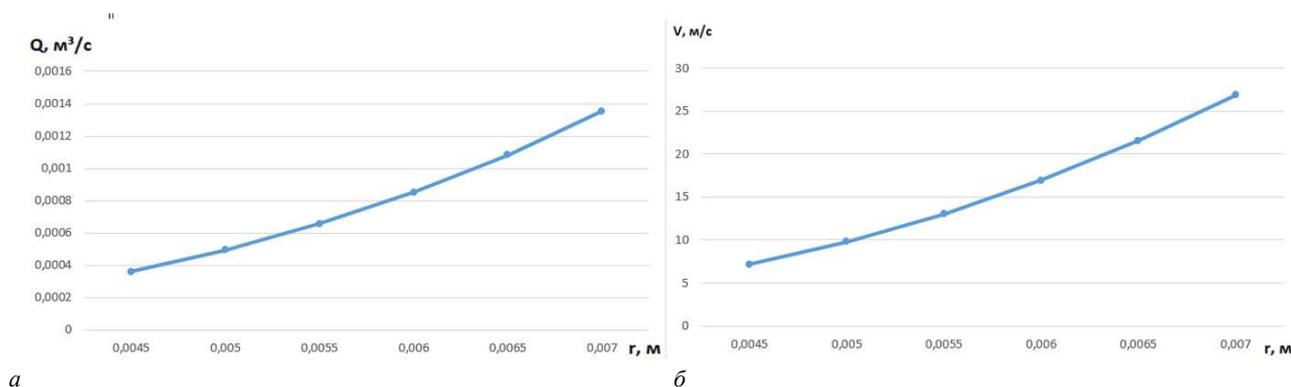


Рисунок 10. – Зависимости производительности подачи объема (а) и скорости (б) потока воздуха от размера радиуса на входе канала

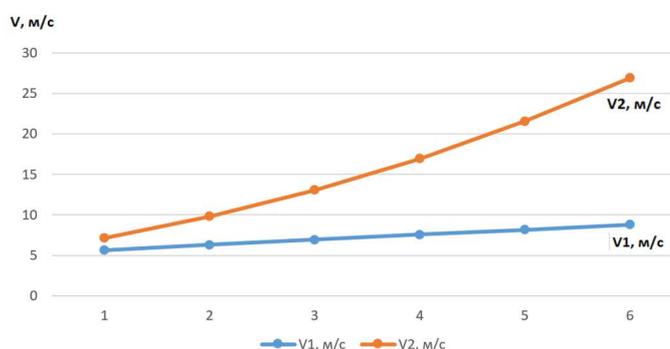


Рисунок 11. – Зависимости скорости потоков на входе и на выходе из канала

Результаты расчетов скорости и производительности объемного потока воздуха через цилиндрические и конические каналы приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов скорости и производительности объемного потока воздуха при обработке комбинированным инструментом через каналы в корпусе инструмента

Параметры канала	Скорость потока воздуха $v$ на выходе из канала, м/с	Производительность объемного потока воздуха $Q$ , м³/с
Цилиндрический канал, диаметр канала 10 мм	6,3	0,0005
Цилиндрический канал, диаметр канала 8 мм	5,1	0,00028
Цилиндрический канал, диаметр канала 6 мм	3,8	0,00012
Конический канал, диаметр на входе 10 мм, на выходе 8 мм	9,916	0,0005
Конический канал, диаметр на входе 12 мм, на выходе 8 мм	16,98	0,000852
Конический канал, диаметр на входе 14 мм, на выходе 8 мм	26,96	0,00135

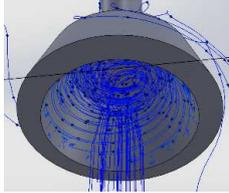
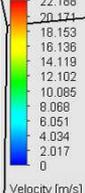
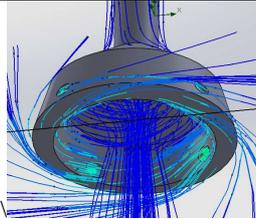
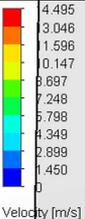
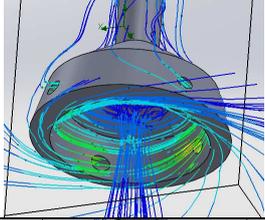
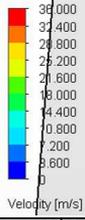
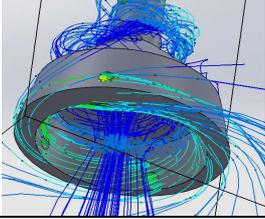
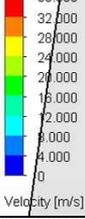
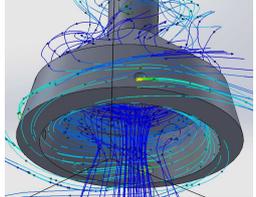
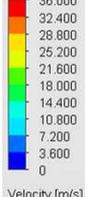
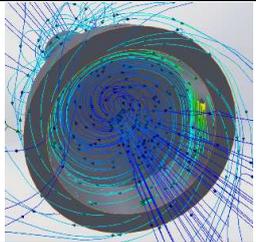
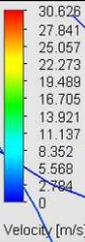
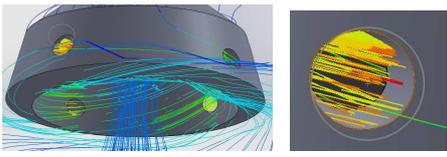
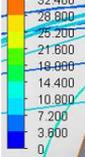
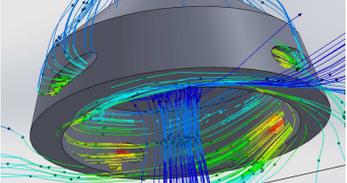
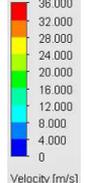
Согласно расчетам скорость потока воздуха будет больше в коническом канале по сравнению с цилиндрическим. Это связано с изменением площади поперечного сечения вдоль оси канала. В коническом канале увеличение площади поперечного сечения на входе приводит к ускорению потока воздуха, т.к. позволяет захватить больший объем из окружающей среды.

Для изучения потоков воздуха при реализации комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей детали было проведено моделирование с использованием программного продукта SOLIDWORKS Flow Simulation. Результаты моделирования скоростей потоков воздуха внутри корпуса инструмента при различных частотах вращения инструмента и геометрических форм и размеров каналов приведены в таблице 2.

Моделирование скоростей потоков воздуха при вращении инструмента с частотой 2000 мин<sup>-1</sup> внутри корпуса без каналов показывает, что их значения не превышают 2–4 м/с (поз. 1, таблица 2), а в корпусе с каналами цилиндрической формы диаметром 10 мм получаем на выходе из него скорости потоков не более 6–7 м/с (поз. 2, таблица 2).

Увеличение частоты вращения инструмента до 12 000 мин<sup>-1</sup> с каналами цилиндрической формы диаметром 10 мм приводит к увеличению скорости потоков до 25 м/с (поз. 3, таблица 2). Следует отметить, что с уменьшением диаметра цилиндрического канала скорость потоков увеличивалась, но объем потока на выходе из канала был незначительным и разбивался внешними потоками (поз. 4 и 5, таблица 2).

Таблица 2. – Результаты моделирования охлаждающих потоков воздуха

№ п/п	Частота вращения инструмента	Форма и размер диаметра канала	Фрагмент моделирования	
			Модель потоков воздуха	Шкала
1	2000 мин <sup>-1</sup>	Без канала		
2	2000 мин <sup>-1</sup>	Цилиндрический Ø10 мм		
3	12 000 мин <sup>-1</sup>	Цилиндрический Ø10 мм		
4	12 000 мин <sup>-1</sup>	Цилиндрический Ø 8 мм		
5	12 000 мин <sup>-1</sup>	Цилиндрический Ø 6 мм		
6	12 000 мин <sup>-1</sup>	Конический Ø10 мм/Ø8 мм		
7	12 000 мин <sup>-1</sup>	Конический Ø14 мм/Ø8 мм		
8	12 000 мин <sup>-1</sup>	Коническими каналами Ø14 мм/Ø8 мм и заборной выемкой		

Моделирование скорости потока воздуха в корпусе инструмента, вращающегося с частотой 12 000 мин<sup>-1</sup>, с коническими отверстиями на входе Ø10 мм и на выходе Ø8 мм (поз. 6, таблица 2) показывает, что скорость потоков не сильно отличается от потоков в модели с цилиндрическими отверстиями Ø8. Однако на шкале для потоков на выходе из каналов конической формы больше преобладает желтый цвет, который соответствует примерно 21 м/с.

Моделирование изменения потоков воздуха с увеличенным диаметром входного конического отверстия до 14 мм (поз. 7, см. таблицу 2) свидетельствует, что скорость потоков увеличивается в полтора раза и достигает порядка 32 м/с.

В результате исследований было предложено доработать конструкцию корпуса режущего инструмента для комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей деталей путем исполнения сквозных конических каналов с размерами на входе 14 мм и на выходе 8 мм.

Кроме того, предложено на наружной поверхности корпуса инструмента для большего захвата воздуха сделать заборную выемку перед входом в конический канал, что привело к увеличению скорости потока на выходе из канала (поз. 8, см. таблицу 2).

Моделирование влияния предложенных изменений конструкции корпуса инструмента на температуру обработанной сферической поверхности в SOLIDWORKS Flow Simulation показало, что температура на поверхности детали снизилась на 15 °С (при заданной температуре поверхности детали в 110 °С), с заданным параметром вращения инструмента 12 000 мин<sup>-1</sup> на выходе из каналов скорость потока составила 20 м/с. На рисунке 12 изображено изменение температуры на поверхности детали в этих условиях.

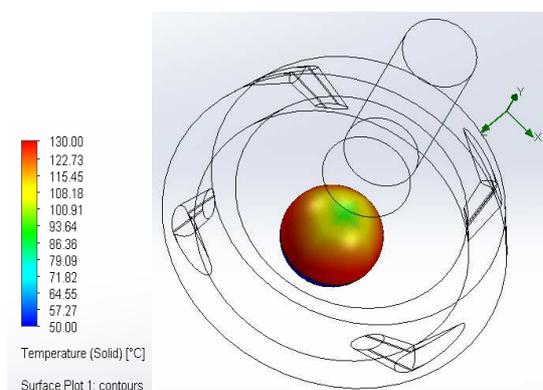


Рисунок 12. – Фрагмент моделирования изменения температуры на поверхности детали

Согласно результатам моделирования, уменьшения температуры поверхности детали на 15 °С недостаточно. В связи с этим в дальнейшем планируется рассмотреть конструкцию корпуса режущего инструмента с установкой специальных сопел на выходе конических отверстий, позволяющих направить поток воздуха непосредственно в зону резания.

**Заключение.** Таким образом, олучены математические формулы для расчета температуры нагрева заготовки цилиндрической формы и детали сферической формы при скоростной обработке, которые позволяют рекомендовать диапазоны изменения угла контакта (глубины резания) и линейных скоростей вращения инструмента и детали для регулирования значений температуры.

Экспериментально установлены зависимости температуры нагрева поверхности детали от времени скоростной обработки при различных значениях частот вращения инструмента и детали и их относительной подачи, что позволяет определить оптимальные значения режима обработки сферической поверхности детали в диапазоне значений частоты вращения инструмента 3000–12 000 мин<sup>-1</sup>.

По результатам моделирования процессов охлаждения зоны резания и инструмента в программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation было предложено усовершенствовать конструкцию корпуса режущего инструмента, что обеспечивает управление тепловыми потоками при скоростной обработке неполных сферических поверхностей детали.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хмельницкий Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Приклад/ науки. Пром-сть. – 2007. – № 8. – С. 53–58.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: [пер. с англ.]. – М.: Наука, 1964 – 487 с.
3. Богданова Е.А. Расчет температурного поля в цилиндрической детали при торцевом ротационном точении // Некоторые вопросы дифференциальных уравнений в решении прикладных задач. – Тула: Тул. политех. ин-т, 1983. – С. 79–81.

4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
5. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов и др. // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 2(55). – С. 87–97.

## REFERENCES

1. Khmel'nitskii, R.S. (2007). Issledovanie protsessa obrabotki sfericheskikh poverkhnostei detalei sposobom okhvatyvayushchego frezerovaniya [Study of the process of processing spherical surfaces of parts using the method of enveloping milling]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 8, 53–58. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Karslou, G. & Eger, D. (1964). *Teploprovodnost' tverdykh tel [Conduction of heat in solids]*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Bogdanova, E.A. (1983). Raschet temperaturnogo polya v tsilindricheskoi detali pri tortsevom rotatsionnom tochenii. *Nekotorye voprosy differentsial'nykh uravnenii v reshenii prikladnykh zadach (79–81)*. Tula: Tul'skii politekhnicheskii institut. (In Russ.)
4. Reznikov, A.N. (1981). *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov*. – Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
5. Popok, N.N., Khmel'nitskii, R.S., Anisimov, V.S. & Gvozd', G.I. (2017). Kompleksnye issledovaniya fizicheskikh i tekhnologicheskikh kharakteristik protsessa obrabotki sfericheskikh poverkhnostei detalei [Complex studies of physical and technological characteristics of the process of processing spherical surfaces of parts]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 2(55), 87–97. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 19.02.2024

**CONTROL OF HEAT AND COOLING FLOWS  
IN RAPID MACHINING OF INCOMPLETE SPHERICAL SURFACES  
OF MACHINE PARTS**

**N. POPOK, R. HMELNITSKI, S. PORTYANKO**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Combined rapid machining of incomplete spherical surfaces of parts is considered, formulas for calculating the cutting temperature taking into account the angle of contact between the tool and the workpiece are derived, the results of experimental studies of the temperature of the part and chips depending on the processing time, as well as modeling of cooling air flows in the tool and the cutting zone are presented.*

**Keywords:** *temperature, heat flow, incomplete spherical surface, rapid machining, multi-blade cutting tool.*

УДК 531.2:621.926.9+621.928

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-45-53

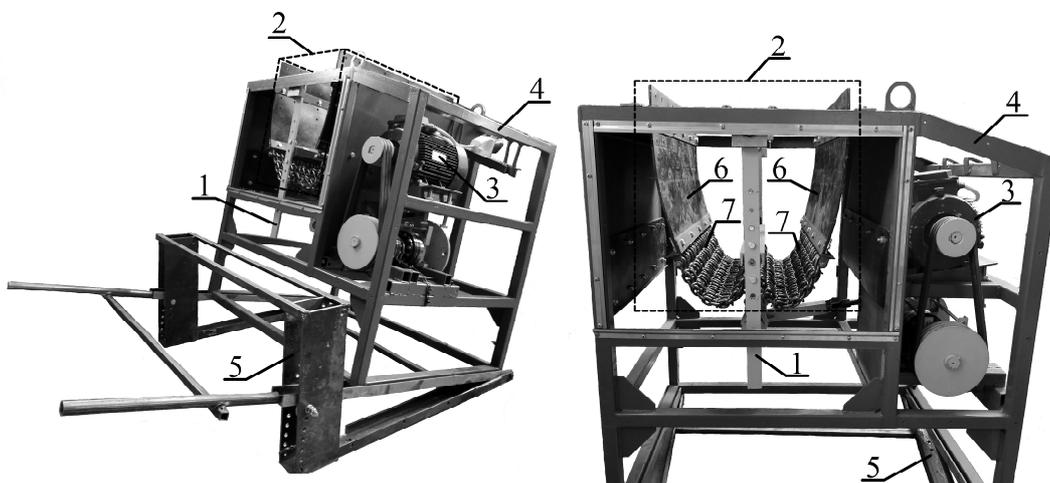
## ДАСЛЕДАВАННЕ СТАНОВІШЧА РАЎНАВАГІ МЕХАНІЗМАЎ РАБОЧАЙ КАМЕРЫ ЛАНЦУЖНАГА АГРЭГАТА

У.А. ПАТАПАЎ, канд. тэхн. навук, дац. С.І. РУСАН  
(Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт)  
д-р тэхн. навук, праф. Л.А. СІВАЧЭНКА  
(Беларуска-Расійскі ўніверсітэт, Магілёў)

Аб'ектам даследавання з'яўляецца рабочая камера ланцужнага агрэгата. Разглядаецца прапанаваная раней яе трохстрыжнявая мадэль у становішчы раўнавагі пад дзеяннем сіл цяжару, форма якой вызначалася з дапамогай вуглавых параметраў  $\alpha_n$  і  $\alpha_n$ , запазычаных з досведу. Тут, у новым даследаванні, прапануецца варыянт аналітычнага вызначэння названых параметраў. Для дасягнення мэты атрыманы трансцэндэнтныя ўраўненні і распрацаваны алгарытм метаду паслядоўных набліжэнняў для іх рашэння. Алгарытм выкарыстаны для лічбавых даследаванняў характару змянення вуглоў  $\alpha_n$ ,  $\alpha_n$  у залежнасці ад суадносін сіл цяжару, прыкладзеных у кінематычных парах, і вугла навароту крывашыта. Пабудаваны адпаведныя графікі. Устаноўлена, што нахіленне плоскасці руху рабочых органаў камеры не ўплывае на вуглавыя параметры, атрыманыя для становішча раўнавагі ў вертыкальнай плоскасці.

**Ключавыя словы:** ланцужны агрэгат, рабочая камера, трохстрыжнявая мадэль, становішча раўнавагі, вуглавыя параметры, трансцэндэнтныя ўраўненні, нахіленае становішча.

**Уступ.** Адною з перспектывных машын для працэсаў дэзінтэграцыі і класіфікацыі матэрыялаў з'яўляецца ланцужны агрэгат. Ён можа быць выкарыстаны, у прыватнасці, для дэзінтэграцыі мелу, мергелю, трэпелу і шэрагу іншых матэрыялаў, а таксама для класіфікацыі (ачытскі) друзавага баласту чыгуначнага пуці. Канструкцыі і функцыянаванне ланцужных агрэгатаў падрабязна апісаны ў манаграфіі [1]. Агульны выгляд эксперыментальнага абразца ланцужнага агрэгата з механізмам змены вугла нахілу рамы прадстаўлены на рысунку 1.



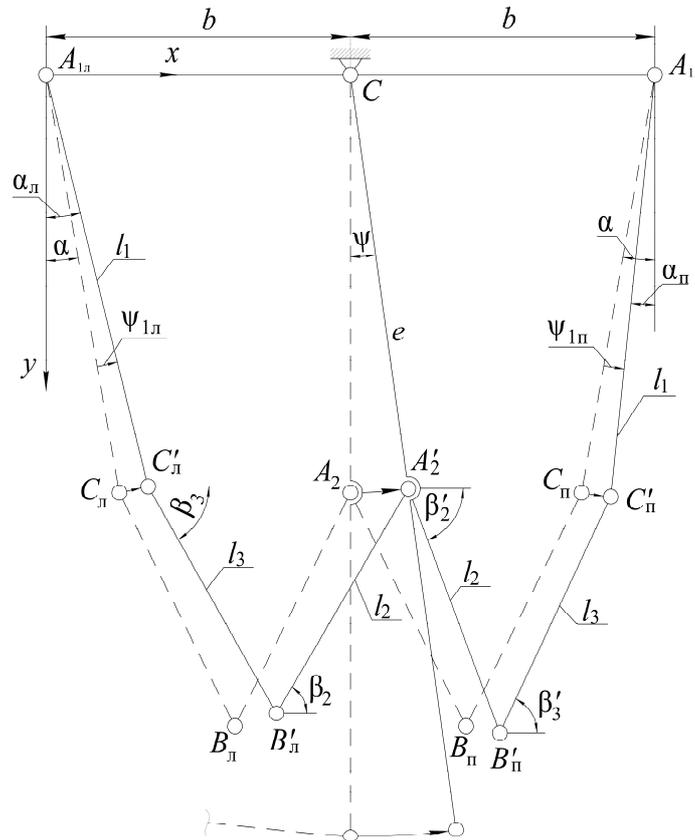
1 – чатырохзвенны прывадны механізм; 2 – рабочая камера; 3 – электрарухавік; 4 – рама;  
5 – механізм змены вугла нахілу рамы; 6 – гнуткія сценкі; 7 – ланцужныя палотны

Рысунак 1. – Эксперыментальны абразец ланцужнага агрэгата ў зборы з механізмам змены вугла нахілу рамы

Яго канструкцыя ўяўляе складаную механічную сістэму, утвораную чатырохзвенным прывадным механізмам 1 агрэгата і рабочай камерай 2. Апошняя складаецца з гнуткіх сценак 6 і ланцужных палотнаў 7 – рабочых органаў агрэгата (гл. рысунак 1). Характар іх руху вызначае эфектыўнасць тэхналагічных працэсаў дэзінтэграцыі і класіфікацыі [2–4]. Аднак кінематыка механізмаў з гнуткімі звянамі – сценак і ланцужнымі палотнамі – не распрацавана. Намі зроблена спроба кампенсаваць названы прабел у механіцы ланцужных механізмаў шляхам іх набліжанага мадэліравання. Для дасягнення мэты выбраны індуктывны метады – паступовы пераход ад прасцейшых мадэлей да больш складаных. На пачатку даследавання разглядалася двухстрыжнявая мадэль рабочага органа камеры [5], затым – трохстрыжнявая (камбінаваная)

[6]. Апошня з іх прадстаўлена на рысунку 2, дзе яна паказана пункцірам у сыходным становішчы (пры  $\psi = 0$ ).

Недахоп апісанага ў рабоце [6] метаду яе даследавання заключаецца ў тым, што вызначальныя вуглы  $\alpha_n = \alpha + \psi_{1n}$ ,  $\alpha_n = \alpha - \psi_{1n}$  даводзілася ўстанаўліваць доследным шляхам. Тут, у нашым новым даследаванні, прапануецца алгарытм іх аналітычнага вылічэння. Класічны спосаб вызначэння становішча раўнавагі кансерватыўнай сістэмы, а значыць, і вуглоў  $\alpha_n$ , патрабуе даследавання мінімуму яе патэнцыяльнай энергіі. Але такі спосаб для нашай складанай мадэлі прыводзіць да надта вялікага аб'ёму аналітычных пераўтварэнняў. Таму намі для дасягнення мэты выкарыстаны звычайныя статычныя ўмовы раўнавагі сістэмы.



Рысунак 2. – Трэхстрыжнявая мадэль рабочай камеры ланцужнага агрэгата

**Вызначэнне геаметрычных суадносін у мадэлях механізмаў рабочай камеры.** Яны спатрэбяцца ў далейшым для складання статычных умоў раўнавагі. Фрагменты механізмаў рабочай камеры ў адвольным становішчы (пры адхіленні каромысла ўправа на вугал  $\psi$ ) паказаны на рысунках 3, 4.

Нагадаем, што паводле прынятых мадэлей масы гнуткіх сценак і ланцужных палотнаў прыводзяцца да вертыкальнай плоскасці сіметрыі агрэгата, што праходзіць праз шатун. На рысунках 2, 3, 4 сценкі прадстаўлены стрыжнямі  $l_1$ , а ланцужныя палотны – стрыжнямі  $l_2, l_3$ . Вуглы, што ўтвараюць стрыжні  $l_1$  з вертыкалямі ў становішчы раўнавагі, абазначым праз  $\alpha$ . Пры адхіленні каромысла ад вертыкалі на вугал  $\psi$  яны паварочваюцца на  $\psi_{1n}, \psi_{1n}$  (гл. рысунак 2). Мадэль рабочага органа камеры з улікам каромысла мае дзве ступені свабоды. Таму паварот сценак наўпрост не залежыць ад руху каромысла. Мяркуем, што яны рухаюцца сінхронна з каромыслам; пры гэтым  $\psi_{1n} = k_n \psi$ ,  $\psi_{1n} = k_n \psi$ . Каэфіцыенты  $k_n, k_n$  вызначаюцца з досведу. Пры сіметрычных паваротах каромысла ўлева і ўправа адносна вертыкалі прымаем  $k_n = k_n$ .

Пры змяненні вуглоў  $\alpha_n, \alpha_n$  змяняюцца і вуглы  $\beta_2, \beta_3, \beta'_2, \beta'_3$ . Запыхым формулы для іх вылічэння праз  $\alpha_n, \alpha_n$  з артыкула [6]. Для левай паловы рабочай камеры  $\beta_2 = \arcsin b_2, \beta_3 = \arcsin b_3$ . Тут  $b_2 = \left[ 2l_y f \pm \sqrt{4l_y^2 f^2 - 4(l_x^2 + l_y^2)(f^2 - l_x^2)} \right] / 2(l_x^2 + l_y^2); \quad b_3 = (l_y + l_2 \sin \beta_2) / l_3, \quad f = l_y \sin \beta_2 - l_x \cos \beta_2,$  дзе  $l_x = x_{A_2} - x_{C'_n}, \quad l_y = y_{A_2} - y_{C'_n}, \quad x_{C'_n} = l_1 \sin \alpha_n, y_{C'_n} = l_1 \cos \alpha_n, \quad x_{A_2} = b + e \sin \psi, y_{A_2} = e \cos \psi$ . Геаметрычныя параметры  $b, e$  паказаны на рысунку 2.

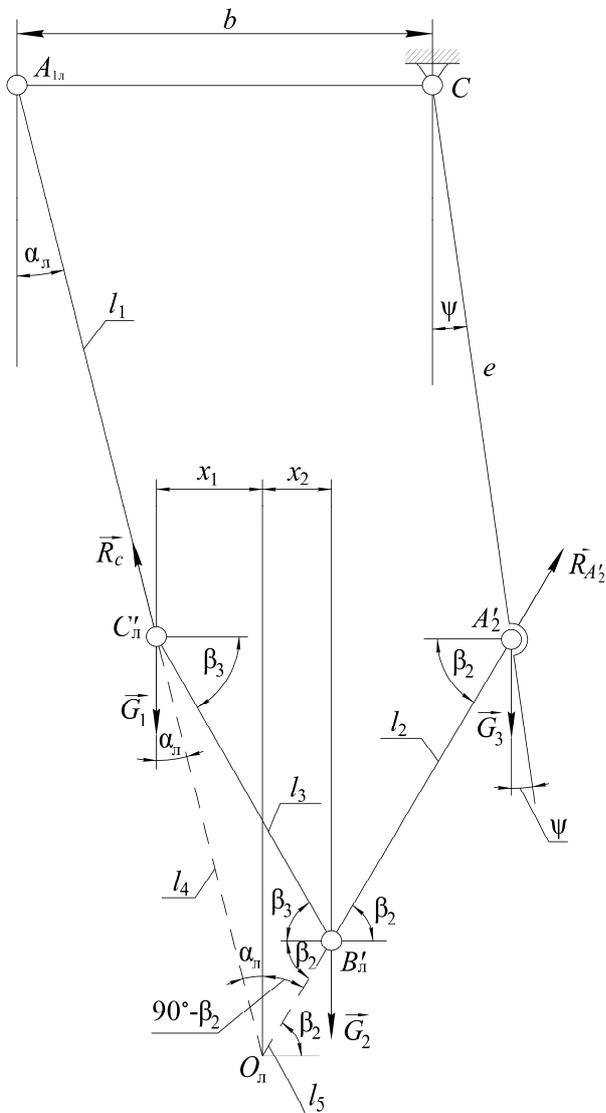


Рисунок 3. – Фрагмент трохсвязной модели рабочего органа левой паловы камеры (да анализу раўнавагі)

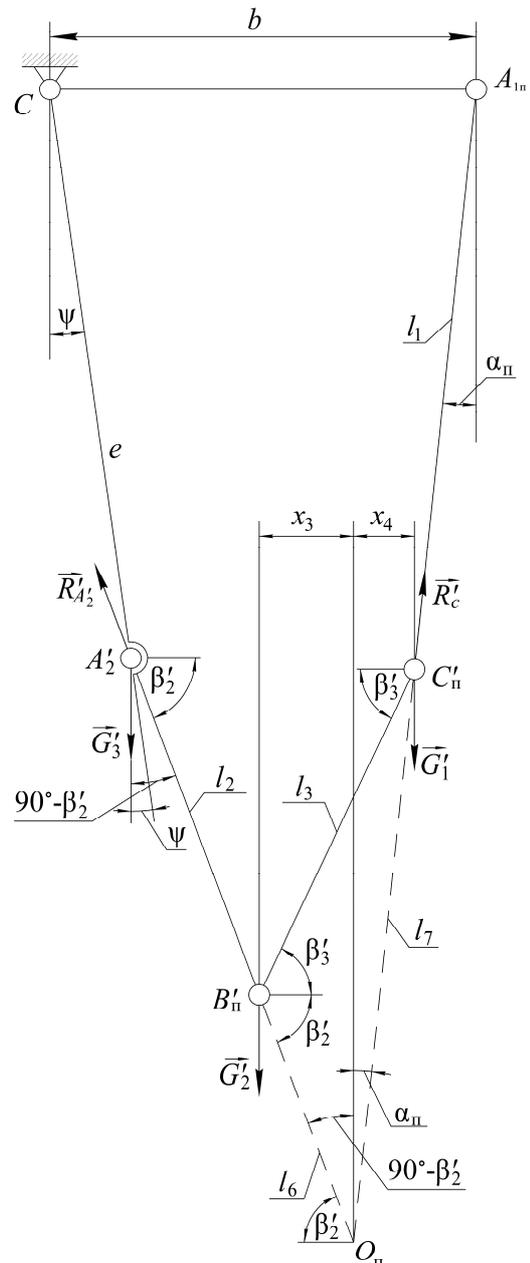


Рисунок 4. – Фрагмент трохсвязной модели рабочего органа правой паловы камеры (да анализу раўнавагі)

Звернемся да рысунка 3. Пункт перасячэння ліній, вызначаных звеннямі  $l_1, l_2$ , абазначым літарай  $O_n$ . Стораны ўтворанага трохвугольніка  $C'_n B'_n O_n$  знаходзім на падставе тэарэмы сінусаў:  $l_4 / \sin(\beta_2 + \beta_3) = l_3 / \sin(90^\circ - \beta_2 + \alpha_n)$ ,  $l_5 / \sin(90^\circ - \beta_3 - \alpha_n) = l_3 / \sin(90^\circ - \beta_2 + \alpha_n)$ ; адсюль

$$l_4 = k_1 l_3; l_5 = k_2 l_3,$$

дзе  $k_1 = \sin(\beta_2 + \beta_3) / \sin(90^\circ - \beta_2 + \alpha_n)$ ;  $k_2 = \sin(90^\circ - \beta_3 - \alpha_n) / \sin(90^\circ - \beta_2 + \alpha_n)$ .

Знаходзім пракцыі старон  $l_4, l_5$  на вось  $A_{1n}x$ :

$$x_1 = l_4 \sin \alpha_n, x_2 = l_5 \cos \beta_2. \tag{1}$$

Алгарытм вылічэння пракцыў  $x_3, x_4$  для правай паловы рабочей камеры (гл. рысунак 4) аналагічны. Паводле таго ж артыкула [6]

$$\beta'_2 = \arcsin b'_2; \quad \beta'_3 = \arcsin b'_3; \quad b'_2 = \left[ 2l'_y f' \pm \sqrt{4(l'_y)^2 (f')^2 - 4[(l'_x)^2 + (l'_y)^2][(f')^2 - (l'_x)^2]} \right] / \sqrt{2[(l'_x)^2 + (l'_y)^2]};$$

$$b'_3 = (y_{B'_n} - y_{C'_n}) / l_3; \quad f' = \left\{ l_3^2 - l_2^2 - [(l'_x)^2 + (l'_y)^2] \right\} / 2l_2, \quad \text{дзе } l'_x = x_{C'_n} - x_{A'_2}; \quad l'_y = y_{A'_2} - y_{C'_n}; \quad x_{C'_n} = 2b - l_1 \sin \alpha_n;$$

$$y_{C'_n} = l_1 \cos \alpha_n; \quad \text{формулы для вылічэння } x_{A'_2}, y_{A'_2} \text{ прыведзены вышэй.}$$

Звяртаемся да рысунка 4. Пункт перасячэння ліній, зададзеных звеннямі  $l_1, l_2$ , абазначым літарай  $O_n$ . Стораны  $l_6, l_7$ , трохвугольніка  $C'_n B'_n O_n$ , як і раней, знаходзім на падставе тэарэмы сінусаў:  $l_6 / \sin(90^\circ - \alpha_n - \beta'_3) = l_3 / \sin(90^\circ + \alpha_n - \beta'_2)$ ;  $l_7 / \sin(\beta'_2 + \beta'_3) = l_3 / \sin(90^\circ + \alpha_n - \beta'_2)$ . Адсюль вызначаем:  $l_6 = k_3 l_3$ ;  $l_7 = k_4 l_3$ , дзе  $k_3 = \sin(90^\circ - \alpha_n - \beta'_3) / \sin(90^\circ + \alpha_n - \beta'_2)$ ;  $k_4 = \sin(\beta'_2 + \beta'_3) / \sin(90^\circ + \alpha_n - \beta'_2)$ .

Знаходзім праекцыі старон  $l_6, l_7$  трохвугольніка  $B'_n C'_n O_n$  на вось  $C_x$ :

$$x_3 = l_6 \cos \beta'_2, \quad x_4 = l_7 \sin \alpha_n \quad (2)$$

**Умовы раўнавагі рабочых механізмаў камеры.** Нагадаем, што мэтай нашага даследавання з'яўляецца вызначэнне становішча раўнавагі (формы) рабочых органаў агрэгата пры ветыкальным і адхіленым каромысле. Для гэтага неабходна знайсці вуглы  $\alpha_n, \alpha_n$ . Усе астатнія –  $\beta_2, \beta_3, \beta'_2, \beta'_3$  – вызначаюцца як функцыі  $\alpha_n, \alpha_n$  па прыведзеных вышэй формулах. Рэальныя ці мысленныя эксперыменты дазваляюць заўважыць, што значэнні  $\alpha_n, \alpha_n$  залежаць ад памераў звенняў, іх мас і масы рэчыва на ланцужных палотках. Таму ўзнікае неабходнасць у правядзенні статычнага сілавога аналізу механізмаў. Будзем меркаваць, што звенні пастаяннага папярочнага сячэння і іх масы пароўну размеркаваны паміж канцавымі парамі (шарнірамі). Маса рэчыва ў кожнай палове камеры прыводзім да трох шарніраў:  $C'_n, B'_n, A'_2$  у левай палове і  $A'_2, B'_n, C'_n$  у правай. Пры гэтым адну яго палову засяроджваем у шарнірах  $B'_n, B'_n$ , а другую размяркоўваем пароўну паміж шарнірамі  $C'_n, A'_2$  і  $A'_2, C'_n$ . Адпаведныя масам сумарныя сілы цяжару на рысунках 3 і 4 абазначаны літарамі  $\vec{G}_i, \vec{G}'_i (i = 1, 2, 3)$ . Сілы, прыкладзеныя ў шарнірах  $A_{1n}, A_{1n}$ , на рысунках не паказаны, паколькі яны, як і сіла  $\vec{G}_3$ , на раўнавагу рабочых механізмаў не ўплываюць.

Каб знайсці велічыні  $\alpha_n, \alpha_n$ , якія адпавядаюць атрыманым сілам цяжару, неабходна склаасці ўмовы раўнавагі асобна для механізмаў левай і правай паловаў рабочай камеры агрэгата. Для гэтага выкарыстаем метадыку, выкладзеную ў курсах тэарэтычнай механікі [7–11] і іншых. У якасці аб'ектаў раўнавагі разгледзім самі рабочыя механізмы. Знешнімі сувязямі для іх з'яўляюцца шарніры  $A_{1n}, A'_2$  і  $A'_2, A_{1n}$ . Рэакцыі гэтых шарніраў перанесены ў пункты  $C'_n, C'_n$  і на рысунках 3, 4 абазначаны літарамі  $\vec{R}_C, \vec{R}'_C$ . Цэнтрамі момантаў прымаем пункты  $O_n, O_n$ . Запісваем умовы раўнавагі:  $G_1 x_1 - G_2 x_2 = 0$ ;  $G'_2 x_3 - G'_1 x_4 = 0$ . Дзелім першую роўнасць на  $G_2$ , другую на  $G'_2$ :

$$\mu x_1 - x_2 = 0; \quad \mu x_4 - x_3 = 0, \quad (3)$$

дзе  $\mu = G_1 / G_2 = G'_1 / G'_2$ . Перапісваем (3) з улікам (1), (2):

$$\mu l_4 \sin \alpha_n - l_5 \cos \beta_2 = 0; \quad (4)$$

$$\mu l_7 \sin \alpha_n - l_6 \cos \beta'_2 = 0. \quad (5)$$

З ураўнення (4) вызначаецца вугал  $\alpha_n$ , з ураўнення (5) –  $\alpha_n$ .

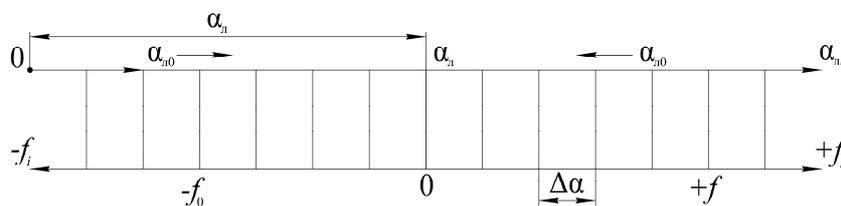
**Алгарытм метаду паслядоўных набліжэнняў.** Звычайнае дакладнае рашэнне трансцэдэнтных ураўненняў (4), (5) у агульным выглядзе немагчыма. Прыменім метады паслядоўных набліжэнняў, выкарыстоўваючы прыватныя значэнні геаметрычных параметраў і суадносінаў  $\mu$ . Яго сутнасць разгледзім на прыкладзе ўраўнення (4). Пачатковае значэнне (нулявое набліжэнне) вугла  $\alpha_n = \alpha_{n0}$  прымаем адвольна, грунтуючыся на досведзе. Левую частку ўраўнення будзем разглядаць як функцыю дыскрэтнай пераменнай  $\alpha_{ni}$  ( $i$  – нумар набліжэння). Абазначым яе праз  $F(\alpha_{ni})$ . Ураўненне (4) перапішам у выглядзе

$$F(\alpha_{ni}) = \pm f_i. \quad (6)$$

Велічыню  $f_i$  назавем дэфектам функцыі  $F(\alpha_{ni})$ . Пры змяненні значэння  $\alpha_{ni}$  змяняецца і дэфект  $f_i$ . Працэс паслядоўных набліжэнняў заключаецца ў пошуку такой велічыні  $\alpha_{ni} = \alpha_n$ , пры якой дэфект дасягае

значэння  $f_i = 0$  (ці блізкага да нуля). Сумесны аналіз рысунка 2 і ўраўнення (4) паказвае, што павелічэнне вугла  $\alpha_{li}$  ў пэўных межах вядзе да павелічэння першага складніка ў гэтым ураўненні і памяншэння другога.

Пры рэалізацы метаду паслядоўных набліжэнняў мэтазгодна кіравацца схемай, паказанай на рысунку 5.

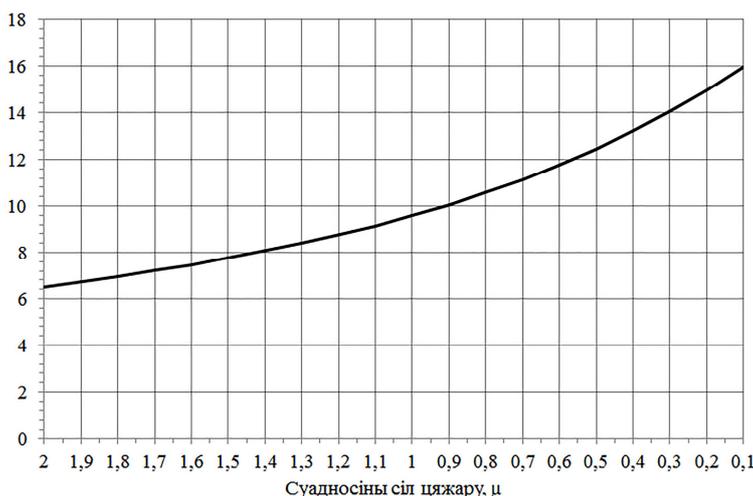


Рысунак 5. – Схема да алгарытму метаду паслядоўных набліжэнняў

На верхняй восі адкладзены дыскрэтныя аргументы ўраўнення (6), на ніжняй – адпаведныя значэнні яго дэфектаў. На шкале аргументаў адрэзкам  $0\alpha_n$  абазначаны шукаемы вугал для левага механізма камеры. Як відаць, да яго можна набліжацца, рухаючыся ад меншых значэнняў  $\alpha_{li}$  злева направа, ці ад большых – справа налева. На схеме напрамкі руху паказаны стрэлкамі. Яны вызначаюцца па знаку ( $\pm$ ) дэфектаў  $f_i$ . Уявім, што нулявому набліжэнню  $\alpha_{l0}$  адпавядае адмоўны дэфект ( $-f_0$ ) (гл. рысунак 5). Тады першае набліжэнне патрэбна шукаць пры  $\alpha_{l1} = \alpha_{l0} + \Delta\alpha$ , г.зн. рухацца злева направа ( $\Delta\alpha$  – малое прырашчэнне вугла  $\alpha$ ). І наступныя набліжэнні таксама вызначаюцца з дадатным  $\Delta\alpha$ :  $\alpha_{li} = \alpha_{l(i-1)} + \Delta\alpha$ . Працэс набліжэнняў прыпыняецца, як ужо адзначалася, пры тым значэнні  $\alpha_{li}$ , якому адпавядае  $f_i = 0$ , ці атрымліваецца, што больш верагодна, першы дадатны дэфект. Пры дадатным дэфекце ў якасці канчатковага значэння вугла  $\alpha_n$  належыць прыняць сярэдняе арыфметычнае з двух яго апошніх набліжэнняў або працягнуць працэс пры меншых  $\Delta\alpha$ , рухаючыся справа налева.

Калі ж пры нулявым набліжэнні атрымаем дадатны дэфект, то працэс набліжэнняў выконваецца справа налева паводле формулы  $\alpha_{li} = \alpha_{l(i-1)} - \Delta\alpha$ .

Для даследавання залежнасці вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  ад суадносін сіл цяжару  $\mu$  і вугла павароту кривашыпа  $\varphi_k$  канкрэтызуем геаметрычныя параметры сістэмы; прымем:  $l_1 = 0,285$  м;  $l_2 = 0,175$  м;  $l_3 = 0,175$  м;  $b = 0,205$  м;  $e = 0,28$  м. Вынікі разлікаў на падставе ўраўненняў (4), (5) прадстаўляем у выглядзе графікаў. Графік на рысунку 6 ілюструе залежнасць вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  ад параметра  $\mu$  пры  $\psi = 0$ .



На восі ардынат паказаны велічыні вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$

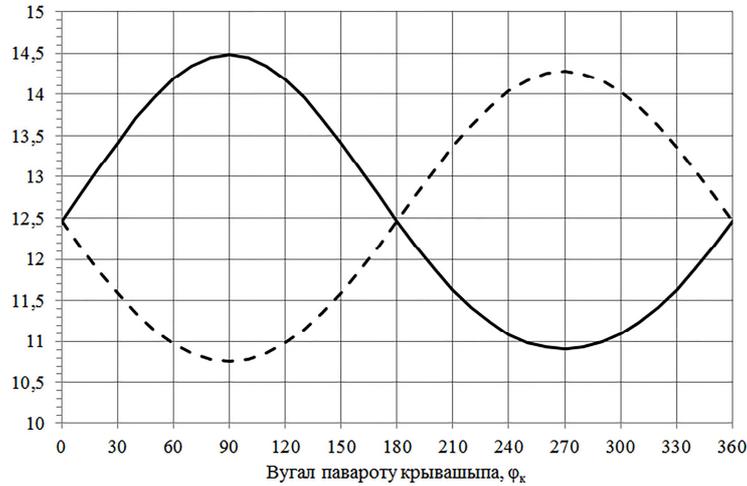
Рысунак 6. – Графік змянення вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  у залежнасці ад суадносін сіл цяжару  $\mu$

Як відаць з рысунка, з памяншэннем суадносін сіл цяжару  $\mu$ , гэта значыць з павелічэннем сіл цяжару ў пунктах  $B_l$  і  $B_n$ , вуглы  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  павялічваюцца паводле закона, блізкага да лінейнага.

Нагадаем, што ў якасці прываднога механізма ў ланцужным агрэгате выкарыстоўваецца чатырохзвенны механізм, уваходным звяном якога з'яўляецца кривашып; вугал яго павароту абазначым праз  $\varphi_k$  і пабудуем графік змянення вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  у залежнасці ад гэтага вугла, выкарыстоўваючы раней распрацаваную метадыку

ўстанаўлення залежнасці паміж вуглом павароту каромысла  $\psi$  і кривашыпа  $\varphi_k$  [12]. Для гэтага ўводзім безразмерныя параметры прываднога механізма і прымаем  $\rho = 0,1$  і  $\lambda = 1$ .

Графік змянення вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  у залежнасці ад вугла павароту кривашыпа  $\varphi_k$  пры  $\mu = 0,5$  прадстаўлены на рысунку 7: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай.



На восі ардынат паказаны велічыні вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$

**Рысунк 7.** – Графік змянення вуглоў  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  у залежнасці ад вугла павароту кривашыпа  $\varphi_k$

Прадстаўлены графік на рысунку 7 дазваляе вызначаць вуглы  $\alpha_l$  і  $\alpha_n$  пры розных становішчах кривашыпа, а значыць і каромысла.

**Аб раўнавазе рабочых органаў камеры ў нахіленым агрэгате.** Некаторыя тэхналагічныя працэсы па перапрацоўцы матэрыялаў неабходна выконваць у нахіленым агрэгате. Гэта патрабуе пэўных удакладненняў у прыведзеныя раней разлікі, у алгарытмах якіх меркавалася, што ўсе звенні рабочых органаў камеры рухаюцца ў вертыкальных плоскасцях. Прывадным звяном для рабочых механізмаў з'яўляецца каромысел. З аналізу яго перамяшчэнняў і пачнем вывучэнне асаблівасцей руху ў нахіленых плоскасцях.

На рысунку 8, а схематычна пункцірам паказана рама агрэгата ў гарызантальным становішчы, а суцэльнай лініяй – у павернутым на вугал  $\alpha_n$  вакол восі  $Vx$ .

Мяркуюцца, што вось  $Vx$  перпендыкулярная да плоскасці чарцяжа і паралельная да плоскасці павароту здвоенага каромысла. Апошняя на рысунку 8, а абазначана літарамі  $ПП$  і  $П'П'$  (праецыруецца ў лініі), а восі павароту каромысла – праз  $Cx$ ,  $C'x$ . На рысунку 8, б прадстаўлены від па стрэлцы  $A$  на плоскасці павароту каромысла. Пры гэтым восі  $Cx$  і  $C'x$  для зручнасці параўнальнага аналізу сумешчаны. Літарамі  $\psi$  абазначаны сапраўдныя амплітудныя вуглы павароту каромысла ў плоскасці  $ПП$  (рысунк 8, а), а праз  $\psi'$  – іх фронтальныя праекцыі з павернутай вакол восі  $Cx$  на вугал  $\alpha_n$  плоскасці  $П'П'$ . Залежнасць паміж гэтымі вугламі ўстанаўліваецца з дапамогай аксанаметрычнага рысунка 9, на якім вертыкальная плоскасць  $\Pi$  перамяшчэння каромысла павернута на вугал  $\alpha_n$  у становішча  $П'$ .

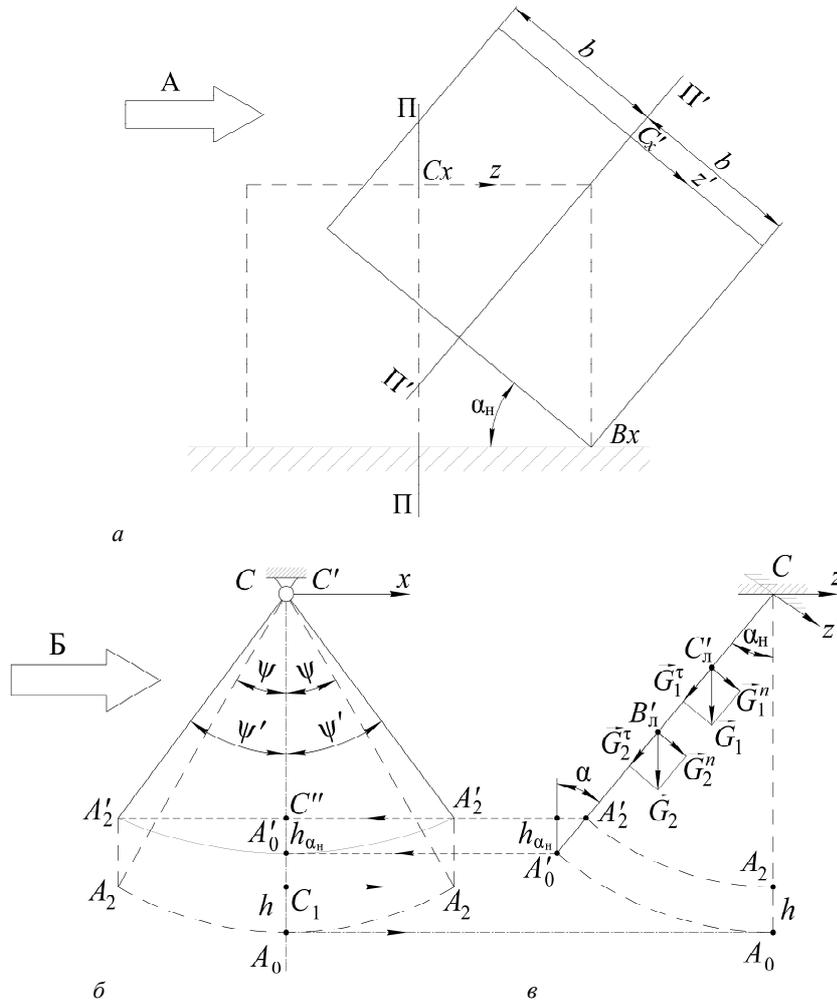
Даўжыні адрэзкаў  $A_2C''$  і  $A_2'A_3$  можна выразіць па-рознаму з двух трохвугольнікаў:  $A_2'A_3C$ ,  $A_2CC_1$  і  $A_2'A_3A_2'$ ,  $A_2'A_3C$ . Параўняўшы знойдзеныя даўжыні, атрымаем роўнасці:  $e' \sin \psi' = e \sin \psi$ ;  $e' \cos \psi' = e \cos \psi \cos \alpha_n$ . Пасля іх сумесных пераўтварэнняў прыходзім да наступнай залежнасці:

$$\sin \psi' = \sin \psi / \sqrt{\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \alpha_n} \quad (7)$$

Як відаць з формулы (7), з павелічэннем вугла павароту  $\alpha_n$  павялічваецца і праекцыя  $\psi'$  на фронтальную плоскасць амплітуднага вугла  $\psi$  павароту каромысла.

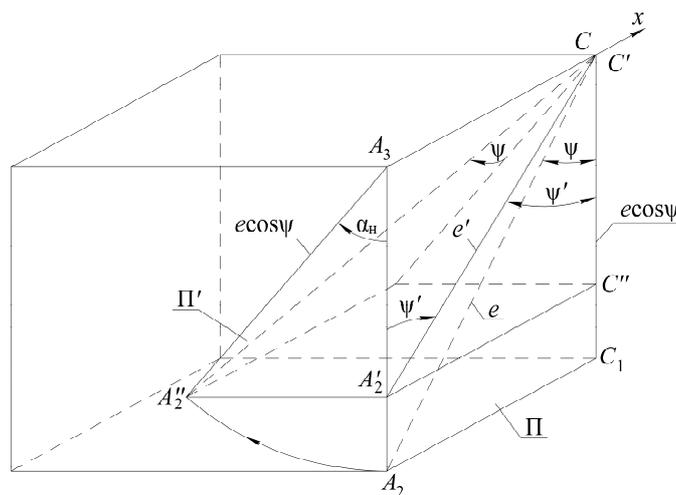
Зноў звернемся да рысунка 8, б. На ім, як і на рысунку 9, пункцірам паказаны каромысел у вертыкальнай плоскасці, а суцэльнай – яго фронтальная праекцыя з павернутай на вугал  $\alpha_n$  плоскасці. Для выразнасці далейшых пабудов вугал  $\alpha_n$  на рысунку 8, в павялічаны.

На рысунках відаць, што пры павароце каромысла ў вертыкальнай плоскасці на амплітудныя вуглы  $\psi$  канец каромысла падымаецца з ніжняга становішча  $A_0$  ў верхняе  $A_2$  на вышыню  $h = A_0C_1$ , а пры яго павароце ў нахіленай плоскасці – на вышыню  $h_{\alpha_n} = A_0'C''$ .



а – схема паварту рамы агрегата; б – від на стрэлцы А; в – від на стрэлцы Б

Рисунак 8. – Ілюстрацыя да аналізу перамяшчэння каромысла ў нахіленай плоскасці



Рысунак 9. – Схема паварту плоскасці  $\Pi$  руху каромысла  $CA_2$  на вугал  $\alpha_n$

Знойдзем  $h$  і  $h_{\alpha_n}$ . Заўважаем, што на рысунку 8, б крывая  $A_2A_0A_2$  ўяўляе сабой дугу акружнасці радыуса  $e$ , а крывая  $A_2'A_0'A_2'$  – дугу эліпса з паўвосямі, роўнымі  $e$  і  $e \cos \alpha_n$ . Пры гэтым

$h = CA_0 - CC_1 = e - e \cos \psi = e(1 - \cos \psi)$ . Пераносім  $h$  з рысунка 8,  $b$  на рысунак 8,  $v$  спачатку на вертыкальную плоскасць  $CA_0$ , а затым на нахіленую  $CA_0'$ , дзе атрымліваем  $h_{\alpha_n} = h \cos \alpha_n$ . Канчаткова:

$$h_{\alpha_n} = e(1 - \cos \psi) \cos \alpha_n. \quad (8)$$

Як бачым з формулы (8), павелічэнне вугла нахілу  $\alpha_n$  прыводзіць да памяншэння высаты  $h_{\alpha_n}$  пад'ёму пункта  $A_2$ . Яна таксама памяншаецца і пры набліжэнні пункта  $A_2$  да восі павароту  $Sx$ . Атрыманая інфармацыя пра залежнасць вышыні  $h_{\alpha_n}$  ад параметраў  $\alpha_n$  і  $e$  дазваляе аргументавана прагназаваць аптымальную магутнасць прываднога рухавіка агрэгата ў дынамічным аналізе.

Звернемся да вызначэння вуглоў  $\alpha_n$ ,  $\alpha_n$  для рабочых механізмаў камеры ў яе нахіленым становішчы. Мяркуем, што рабочыя механізмы пры нахіленні агрэгата застаюцца ў адной плоскасці з каромыслам. Тады для даследавання ўплыву павароту плоскасці на вуглы  $\alpha_n$ ,  $\alpha_n$  можна скарыстацца рысункам 8. Пераносім сілы  $G_1$ ,  $G_2$  з рысунка 3 на рысунак 8,  $v$ , дзе раскладваем іх на нармальныя да плоскасці  $G_1^n$ ,  $G_2^n$  і тангенцыяльныя  $G_1^t$ ,  $G_2^t$  складаемыя. На раўнавагу рабочых механізмаў у нахіленай на вугал  $\alpha_n$  плоскасці ўплываюць толькі складаемыя  $G_1^t$ ,  $G_2^t$ , якія вылічваюцца па формулах  $G_1^t = G_1 \cos \alpha_n$ ,  $G_2^t = G_2 \cos \alpha_n$ . Знаходзім суадносіны для ўраўнення (4):  $\mu = G_1^t / G_2^t = G_1 / G_2$ . Як бачым, яны не змяніліся. Тое ж атрымаем і для правага рабочага механізма. Прыходзім да высновы, што нахіл плоскасці перамяшчэння рабочых органаў камеры не ўплывае на іх становішча раўнавагі і вызначаецца тымі ж ураўненнямі (4), (5), што атрыманы для вертыкальнай плоскасці перамяшчэння. Аднак пры нахіленай плоскасці на механізмы дзейнічае прасторавая сістэма сіл, што адмоўна ўплывае на рэакцыі ў кінематычных парах.

**Заклучэнне.** У даследаванні атрыманы ўраўненні для вызначэння вуглавых параметраў, якія ўстанаўліваюць палажэнне раўнавагі механізмаў рабочай камеры. Прапанаваны алгарытм паслядоўных набліжэнняў для іх рашэння. Паказана, што нахіленне плоскасці руху рабочых органаў камеры не ўплывае на вуглавыя параметры, атрыманыя для становішча раўнавагі ў вертыкальнай плоскасці.

#### ЛІТАРАТУРА

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, В.А. Сиваченко и др.; под науч. ред. Л.А. Сиваченко. – Барановичи: БарГУ, 2020. – 359 с.
2. Потапов В.А., Сиваченко Л.А. Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2020. – Вып. 8. – С. 98–105.
3. Потапов В.А., Сиваченко Л.А., Дремук В.А. Исследование влияния режимов работы цепного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2021. – Вып. 9(1) – С. 37–43.
4. Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Кузьменкова М.С. Многоцелевые технологические аппараты с гибким волновым рабочим оборудованием // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. Машиностроение и машиноведение. – 2022. – № 9. – С. 88–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-88-98
5. Патапаў У.А., Русан С.І., Сівачэнка Л.А. Мадэліраванне і аналіз сілавога ўзаемадзеяння звянняў у рабочай камеры ланцужага агрэгата // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2023. – №1(130). – С. 95–108. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-95-108
6. Патапаў У.А., Русан С.І., Сівачэнка Л.А. Камбінаваная і трохстрыжнявая мадэлі рабочых органаў камеры ланцужага агрэгата і іх даследаванне // Вестн. Брест. гос. техни. ун-та. – 2023. – № 2(131). – С. 85–92. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-85-92
7. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: учеб. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
8. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики: учеб. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1966. – 439 с.
9. Хвасько Г.М. Курс тэарэтычнай механікі. – Мінск: БДТУ, 2000. – 354 с.
10. Хвасько Г.М. Тэарэтычная механіка. Практыкум: у 2 ч. – Мінск: БДТУ, 2004. – Ч. 1. – 187 с.
11. Чигарев А.В., Чигарев Ю.В. Курс теоретической механики: учеб. пособие. – Минск: Новое знание; М.: ЦУПІ, 2010. – 399 с.
12. Патапаў У.А., Русан С.І., Сівачэнка Л.А. Даследаванне асіметрыі ваганняў выхаднога звяна прываднога механізма ланцужага агрэгата // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14. – С. 167–173.

#### REFERENCES

1. Sivachenko, L.A., Sotnik, L.L., Sivachenko, T.L., Potapov, V.A., Abdulkalikova, G.M., Korzun, I.M. ... Dydyshko, I.M. (2020). *Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh adaptivnogo deistviya*. Baranavichy: Baranavichy State University. (In Russ.)
2. Potapov, V.A. & Sivachenko, L.A. (2020). Tsepnoi agregat s volnovo rabochei kameroy i adaptivnym mekhanizmom silovogo vozdeistviya dlya pererabotki vlazhnykh syr'evykh materialov [Chain unit with a wave working chamber and adaptive mechanism of force influence for reprocessing humid raw materials]. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [BarSU Herald. Series: Technical sciences]*, (8), 98–105. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Potapov, V.A., Sivachenko, L.A. & Dremuk, V.A. (2021). Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty tsepnogo agregata na pokazateli protsessa izmel'cheniya mela v tekhnologii proizvodstva izvesti [Research of the influence of the operating modes

- of the chain unit on the indicators of the process of grinding chalk in the technology of lime production]. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [BarSU Herald. Series: Technical sciences]*, 9(1), 37–44. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Sivachenko, L.A., Potapov, V.A. & Kuzmenkova, M.S. (2022). Mnogotselnyye tekhnologicheskie apparaty s gibkim volnovym rabochim oborudovaniem [Multifunctional technological apparatuses with flexible wave working equipment]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]*, 7(9), 88–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-88-98. (In Russ., abstr. in Engl.)
  5. Patapaŭ, U.A., Rusan, S.I. & Sivachenka, L.A. (2023). Madeliravanne i analiz silavoga žzaemadzeyannya zvennyaŭ u rabochai kamery lantsuzhnaga agregata [Modeling and analysis of force interaction of links in the working chamber of the chain unit]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of Brest State Technical University]*, 1(130), 95–108. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-95-108. (In Belarus., abstr. in Engl.)
  6. Patapaŭ, U.A., Rusan, S.I. & Sivachenka, L.A. (2023). Kambinavanaya i trokhstryzhnyavaya modeli rabochoykh organaŭ kamery lantsuzhnaga agregata i ikh dasledavanne [Combined and three-rod models of the working bodies of the chain unit chamber and their research]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of Brest State Technical University]*, 2(131), 85–92. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-85-92. (In Belarus., abstr. in Engl.)
  7. Nikitin, N.N. (1990). *Kurs teoreticheskoi mekhaniki*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
  8. Yablonskii, A.A. & Nikiforova, V.M. (1966). *Kurs teoreticheskoi mekhaniki*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
  9. Khvyas'ko, G.M. (2000). *Kurs tearetychnai mekhaniki*. Minsk: BDTU. (In Belarus.)
  10. Khvyas'ko, G.M. (2004). *Tearetychnaya mekhanika. Praktykum*. Minsk: BDTU. (In Belarus.)
  11. Chigarev, A.V. & Chigarev, Yu.V. (2010) *Kurs teoreticheskoi mekhaniki*. Minsk: Novoe znanie. Moscow: TsUPL. (In Russ.)
  12. Patapaŭ U.A., Rusan S.I. & Sivachenka L.A. (2021). Dasledavanne asimetryi vagannyaŭ vykhadnoga zvyana pryvadnoga mekhanizma lantsuzhnaga agregata [Investigation of the asymmetry of the output link oscillations for the chain unit drive mechanism]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii [Mechanics. Investigations and Innovations]*, (14), 167–173. (In Belarus., abstr. in Engl.)

Паступіў 05.01.2024

#### STUDY OF THE EQUILIBRIUM POSITION OF THE MECHANISMS OF THE WORKING CHAMBER OF A CHAIN UNIT

V. POTAPOV, S. RUSAN  
(Baranavichy State University)  
L. SIVACHENKO  
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

The object of study in the article is the working chamber of the chain unit. We consider its previously proposed three-rod model in the equilibrium position under the influence of gravity, the shape of which was determined using the angular parameters  $\alpha_n$  and  $\alpha_n$  borrowed from experience. Here, in a new study, a variant of the analytical determination of these parameters is proposed. To achieve the goal, transcendental equations are obtained and an algorithm for the successive approximation method is developed to solve them. An algorithm used for numerical studies of the nature of changes in angles  $\alpha_n$ ,  $\alpha_n$  depending on the ratio of gravity forces applied in kinematic pairs and the crank rotation angle. The corresponding graphs have been built. It has been established that the inclination of the plane of movement of the working parts of the chamber does not affect the angular parameters obtained for the equilibrium position in the vertical plane.

**Keywords:** chain unit, working chamber, three-rod model, equilibrium position, angular parameters, transcendental equations; inclined position.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ МЕХАНИЗМОВ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЦЕПНОГО АГРЕГАТА

В. ПОТАПОВ, С. РУСАН  
(Барановичский государственный университет)  
Л. СИВАЧЕНКО (Белорусско-Российский университет, Могилев)

Объектом исследования в статье является рабочая камера цепного агрегата. Рассматривается предложенная ранее ее трехстержневая модель в положении равновесия под действием сил тяжести, форма которой определялась с помощью угловых параметров  $\alpha_n$  и  $\alpha_n$ , заимствованных из опыта. Здесь, в новом исследовании, представлен вариант аналитического определения названных параметров. Для достижения цели получены трансцендентные уравнения и разработан алгоритм метода последовательных приближений для их решения. Алгоритм используется для числовых исследований характера изменения углов  $\alpha_n$  и  $\alpha_n$  в зависимости от соотношения сил тяжести, приложенных в кинематических парах, и угла поворота кривошипа. Построены соответствующие графики. Установлено, что наклон плоскости движения рабочих органов камеры не влияет на угловые параметры, полученные для положения равновесия в вертикальной плоскости.

**Ключевые слова:** цепной агрегат, рабочая камера, трехстержневая модель, положение равновесия, угловые параметры, трансцендентные уравнения, наклонное положение.

УДК 621.833

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-54-60

## СНИЖЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ВАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХПОТОЧНОЙ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. П.Н. ГРОМЫКО, канд. техн. наук, доц. С.Н. ХАТЕТОВСКИЙ,  
канд. техн. наук, доц. И.В. ТРУСОВ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Приведены кинематические схемы и компьютерный анализ трех видов схем эксцентрикковой передачи. Представлены графические зависимости кинематической погрешности эксцентрикковой передачи при соосном и параллельном расположении входного и выходного валов в двух однопоточных схемах ее нагружения. Компьютерный анализ эксцентрикковой передачи с однопоточными схемами нагружения показал, что кинематическая погрешность при соосном расположении входного и выходного валов ниже в 30 раз, чем при параллельном расположении указанных валов. С целью снижения кинематической погрешности эксцентрикковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов предложена двухпоточная схема нагружения. Установлено, что применение двухпоточной схемы нагружения по сравнению с однопоточной позволяет в 12 раз снизить кинематическую погрешность при нагрузке на выходном валу 10 Н·м.*

*Планируется конструкцию эксцентрикковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с несколькими потоками мощности применять при проектировании различного рода редукторов для культиваторов.*

**Ключевые слова:** эксцентрикковая передача с соосным расположением входного и выходного валов, эксцентрикковая передача с параллельным расположением входного и выходного валов, сателлит, центральное колесо, компьютерная модель эксцентрикковой передачи, двухпоточная схема нагружения, кинематическая погрешность выходного вала.

**Введение.** Существует немало разновидностей эксцентрикковой передачи с соосным расположением входного и выходного валов, которые применяются в различных отраслях машиностроения, отличающихся большим диапазоном передаточных отношений [1; 2]. Однако известны варианты компоновки привода, когда входной и выходной валы могут быть параллельны друг другу. Такие компоновки привода широко используют в машиностроении, например, цепные и клиноременные передачи. Но эксцентрикковые передачи имеют возможность, в отличие от цепных и клиноременных, обеспечивать передаточное отношение от 15 до 70. Поэтому представляет интерес идея параллельного расположения входного и выходного валов в эксцентрикковой передаче.

В настоящее время эксцентрикковые редукторы с параллельным расположением входного и выходного валов разрабатываются для различного рода культиваторов, рабочий орган которых должен иметь низкую частоту вращения и высокий крутящий момент на выходном валу.

**Основная часть.** Результаты исследования компьютерных моделей эксцентрикковых передач с соосным и параллельным расположением валов с однопоточной схемой нагружения. На рисунке 1 показаны однопоточные схемы нагружения эксцентрикковой передачи с совпадающими (рисунк 1, а) и параллельными<sup>1,2</sup> осями входного и выходного валов (рисунк 1, б).

При однопоточной схеме нагружения на входном валу 1 размещен один эксцентрик 2, на который посажен сателлит 3. Благодаря наличию дополнительных находящихся в одной фазе эксцентриков 4 и 5, вращающихся на осях 6 и 7, сателлит 3 совершает поступательное движение. Сателлит 3 имеет наружные зубья 8, которые взаимодействуют с внутренними зубьями 9 центрального колеса, жестко связанного с выходным валом 10.

Работа эксцентрикковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов аналогична работе эксцентрикковой передачи с соосным расположением указанных валов. Отличительной особенностью схемы, изображенной на рисунке 1, б, является то, что ось входного вала 1 смещена в радиальном направлении от оси выходного вала 10.

Для оценки основных показателей однопоточных эксцентрикковых передач были разработаны компьютерные модели, представленные на рисунке 2 [3].

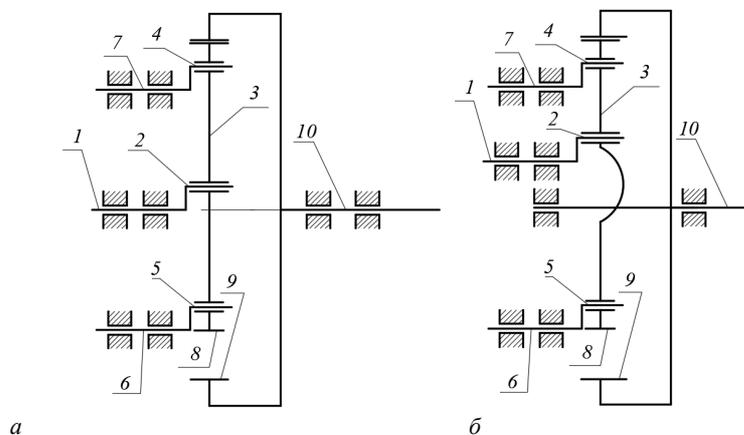
На выходном валу 1 (рисунк 2, а) жестко расположен эксцентрик 2, на котором посредством вращательной пары установлен сателлит 3. На сателлите 3 имеются восемь отверстий 5, в которые вставлены восемь неподвижных осей 4, параллельных входному валу 1. Сателлит 3, благодаря эксцентрику 2 и восьми неподвижным осям 4, совершает поступательное движение. Наружные зубья 6 сателлита 3 взаимодействуют с внутренними

<sup>1</sup> Планетарная передача: а.с. 1778392 СССР, МКИЗ F16H 1/32 / Г.П. Большаков (СССР). – Оpubл. 30.11.1992.

<sup>2</sup> Планетарная эксцентрикковая передача: пат. 12380 РБ, МПК F 16 H 1/32 / П.Н. Громько, С.Д. Макаревич, А.С. Макаревич. – Оpubл. 30.08.2020.

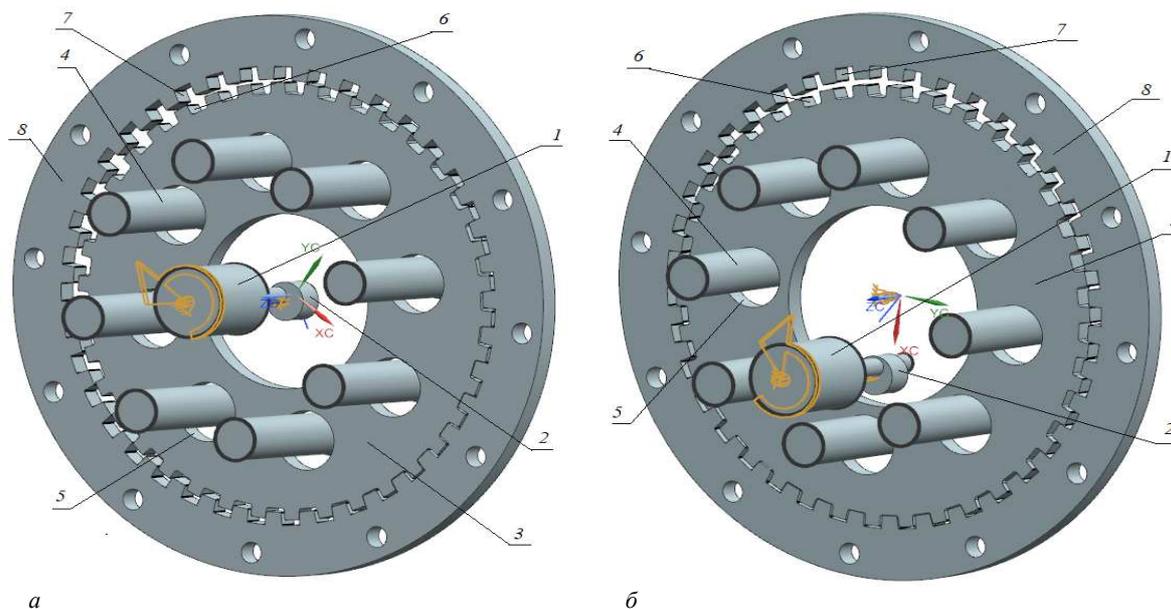
зубьями 7 центрального колеса 8, приводя его во вращательное движение. Передаточное отношение рассматриваемых вариантов эксцентриковой передачи определяется числом зубьев сателлита 3 и центрального колеса 8.

Отличительной особенностью компьютерной модели эксцентриковой передачи, представленной на рисунке 2, б, является расположение оси входного вала 1 от оси центрального колеса 8 на некотором расстоянии.



**а** – соосное расположение входного и выходного валов; **б** – параллельное расположение входного и выходного валов;  
**1** – входной вал; **2, 4, 5** – эксцентрики; **3** – сателлит; **6, 7** – оси эксцентриков; **8** – зубья сателлита;  
**9** – зубья центрального колеса; **10** – выходной вал

**Рисунок 1. – Схемы эксцентриковой передачи с однопоточной схемой нагружения**

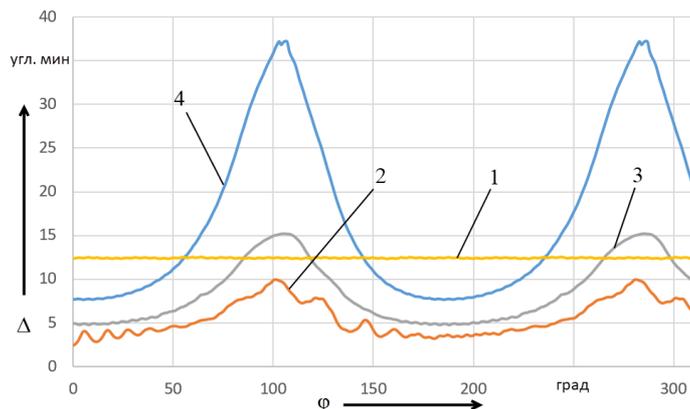


**а** – соосное расположение входного и выходного валов; **б** – параллельное расположение входного и выходного валов;  
**1** – входной вал; **2** – эксцентрик; **3** – сателлит; **4** – неподвижная ось, **5** – отверстия в сателлите;  
**6** – зубья сателлита; **7** – зубья центрального колеса; **8** – центральное колесо

**Рисунок 2. – Вид компьютерной модели эксцентриковой передачи с однопоточной схемой нагружения**

По результатам компьютерных исследований кинематической погрешности эксцентриковой передачи с соосным и параллельным расположением входного и выходного валов были получены графические зависимости, представленные на рисунке 3<sup>3</sup> [4].

<sup>3</sup> Gromyko P.N., Khatetovsky S.N. Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links // Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport” (AviaENT 2018) / Irkutsk, Russia (May 21–26, 2018). – Irkutsk, 2018. – Vol. 158. – P. 160–164.



1 – соосное расположение входного и выходного валов при выходном моменте 10 кг·м; 2 – параллельное расположение входного и выходного валов при выходном моменте 0,1 кг·м; 3 – параллельное расположение входного и выходного валов при выходном моменте 1 кг·м; 4 – параллельное расположение входного и выходного валов при выходном моменте 10 кг·м

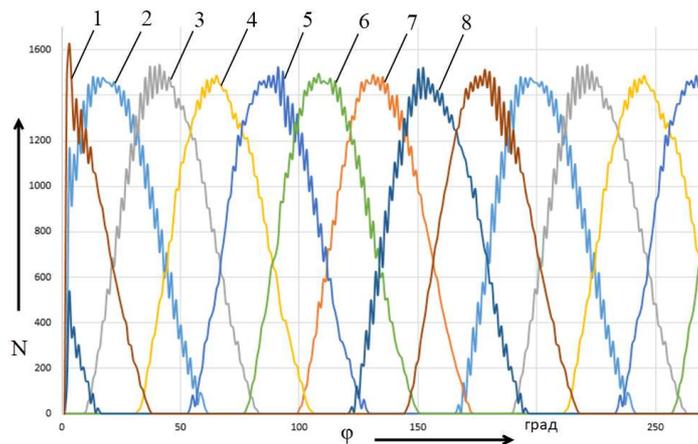
Рисунок 3. – Графическая зависимость кинематической погрешности эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала

Результаты компьютерных исследований позволили установить следующее (см. рисунок 3):

- кинематическая погрешность при соосном расположении входного и выходного валов и при выходном моменте 10 кг·м не превышает угловой минуты (график 1);
- при параллельном расположении входного и выходного валов (график 4) и при выходном моменте 10 кг·м угловая погрешность составляет не более 30 угловых минут;
- значения кинематической погрешности при параллельном расположении входного и выходного валов и при нагрузках 10 кг·м, 1 кг·м и 0,1 кг·м составляют соответственно 30 угловых минут (график 4), 10 угловых минут (график 3) и до 8 угловых минут (график 2).

На основании полученных графических зависимостей можно сделать вывод, что при прочих равных условиях при соосном расположении входного и выходного валов кинематическая погрешность эксцентриковой передачи ниже, чем при параллельном расположении указанных валов.

Компьютерные исследования позволяют оценить величины нормальных сил, возникающих при контакте неподвижных роликов 4 и сателлита 5 эксцентриковой передачи с соосным расположением входного и выходного валов. Графические зависимости нормальных сил показаны на рисунке 4.

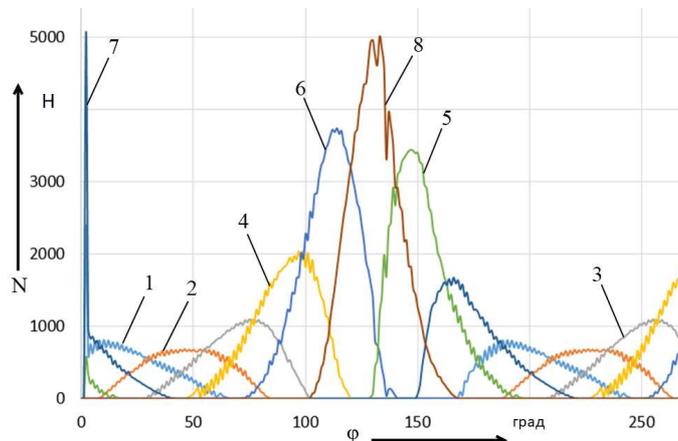


1 – первая контактная пара; 2 – вторая контактная пара; 3 – третья контактная пара; 4 – четвертая контактная пара; 5 – пятая контактная пара; 6 – шестая контактная пара; 7 – седьмая контактная пара; 8 – восьмая контактная пара

Рисунок 4. – Графическая зависимость значений нормальных сил взаимодействия неподвижных роликов и сателлита эксцентриковой передачи с соосным расположением входного и выходного валов от угла поворота входного вала при выходном моменте 10 кг·м

Как видно из графиков (см. рисунок 4), зависимости нормальных сил для каждого ролика одинаковы. Максимальное значение нормальных сил составляет 1500 Н.

Рассмотрим зависимости нормальных сил контакта, возникающих в эксцентриковой передаче с параллельным расположением входного и выходного валов (рисунок 5).



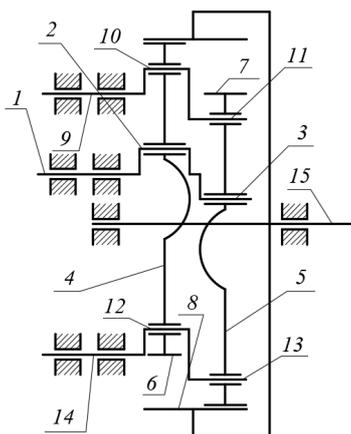
1 – первая контактная пара; 2 – вторая контактная пара; 3 – третья контактная пара; 4 – четвертая контактная пара; 5 – пятая контактная пара; 6 – шестая контактная пара; 7 – седьмая контактная пара; 8 – восьмая контактная пара

**Рисунок 5. – Графическая зависимость значений нормальных сил контакта для эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов от угла поворота входного вала при выходном моменте 10 кг·м**

Анализируя графические зависимости на рисунке 5, можно констатировать, что максимальные значения нормальных сил для эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов могут колебаться от 500 Н до 5 000 Н.

Одним из методов достижения более равномерного распределения нагрузки в эксцентриковой передаче с параллельным расположением входного и выходного валов является использование многопоточной схемы нагружения.

*Результаты испытаний компьютерной модели эксцентриковой передачи с параллельным расположением валов с двухпоточной схемой нагружения.* На рисунке 6 показана схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов и двумя потоками нагружения.



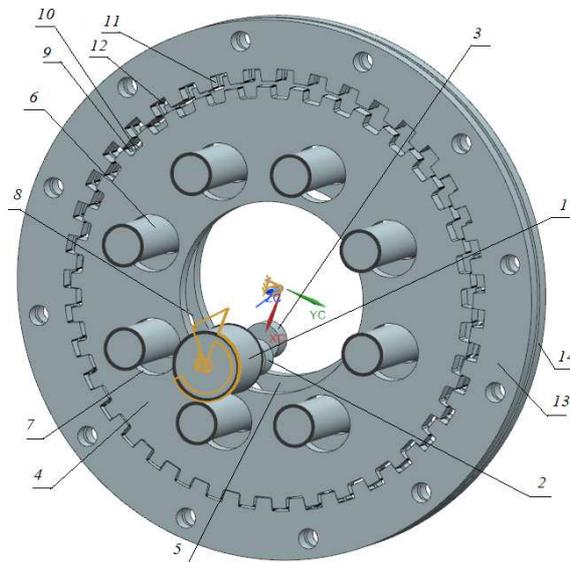
1 – входной вал; 2, 3 – эксцентрики; 4, 5 – сателлитные колеса; 6, 7 – наружные зубчатые венцы сателлитов; 8 – центральное колесо; 9, 14 – оси дополнительных эксцентриков; 10–13 – дополнительные эксцентрики

**Рисунок 6. – Схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов и двумя потоками нагружения**

На входном валу 1 закреплены в противофазе эксцентрики 2 и 3, на которых размещены, соответственно, сателлиты 4 и 5. Сателлиты 4 и 5 совершают поступательные движения благодаря наличию дополнительных эксцентриков 10 и 11 и дополнительных эксцентриков 12 и 13, размещенных на осях 9 и 14. Сателлитные колеса 4 и 5 имеют наружные зубья 6 и 7, взаимодействующие с внутренними зубьями 8 центрального колеса, жестко связанного с выходным валом 15.

Для проведения исследований была разработана компьютерная модель эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов и двухпоточной схемой нагружения (рисунок 7).

На входном валу 1 жестко расположены в противофазе эксцентрики 2 и 3, на которых посредством вращательных пар установлены сателлитные колеса 4 и 5 соответственно. На сателлитных колесах 4 и 5 имеются отверстия 7 и 8, в которые вставлены восемь неподвижных осей 6. Сателлитные колеса 4 и 5, благодаря наличию основных эксцентриков 2 и 3 и осей 6, размещенных в отверстиях 7 и 8, совершают в противофазе поступательные движения. Наружные зубья 9 и 10 взаимодействуют с внутренними зубьями 11 и 12 центральных колес 13 и 14, приводя их во вращательное движение.

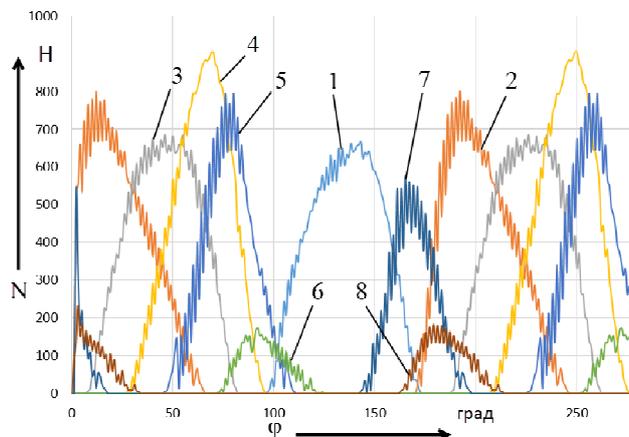


1 – входной вал; 2, 3 – эксцентрики; 4, 5 – сателлитные колеса; 6 – неподвижная ось; 7, 8 – отверстия в сателлитах; 9, 10 – зубья сателлита; 11, 12 – зубья центральных колес; 13, 14 – центральные колеса

Рисунок 7. – Вид компьютерной модели эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов и двухпоточной схемой нагружения

Компьютерные исследования модели (см. рисунок 7) позволяют оценить значения нормальных сил в контакте неподвижных роликов 6 и отверстий 7 и 8 сателлитных колес 4 и 5.

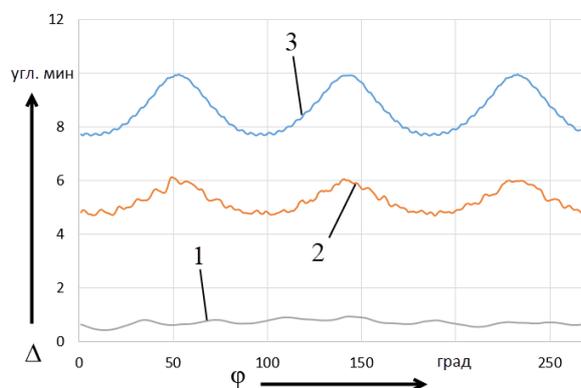
На основании графических зависимостей, показанных на рисунке 8, можно сделать вывод, что максимальные значения нормальных сил колеблются в пределах от 600 до 900 Н, что значительно меньше по сравнению с однопоточной схемой нагружения.



1 – первая контактная пара; 2 – вторая контактная пара; 3 – третья контактная пара; 4 – четвертая контактная пара; 5 – пятая контактная пара; 6 – шестая контактная пара; 7 – седьмая контактная пара; 8 – восьмая контактная пара

Рисунок 8. – Графическая зависимость значений нормальных сил, возникающих при контакте неподвижных роликов и сателлитных колес эксцентриковой передачи с двухпоточной схемой нагружения от угла поворота входного вала при выходном моменте 10 кг·м

На рисунке 9 представлены графические зависимости кинематической погрешности эксцентриковой передачи с двухпоточной схемой нагружения от угла поворота входного вала при нагрузках на выходном валу 0,1 Н·м, 1 Н·м и 10 Н·м.



1 – при выходном моменте 0,1 кг·м; 2 – при выходном моменте 1 кг·м;  
3 – при выходном моменте 10 кг·м

**Рисунок 9. – Кинематическая погрешность эксцентриковой передачи с двухпоточной схемой нагружения и параллельным расположением входного и выходного валов**

Анализ графических зависимостей на рисунке 9 приводит к выводу, что при нагрузках на выходном валу 0,1 Н·м, 1 Н·м и 10 Н·м кинематическая погрешность составляет 0,5, 1,5 и 2,3 угловых минуты соответственно, что значительно меньше по сравнению с однопоточной схемой нагружения.

**Заключение.** Согласно результатам компьютерных исследований кинематическая погрешность эксцентриковой передачи с соосным расположением входного и выходного валов при прочих равных условиях значительно ниже, чем кинематическая погрешность в случае параллельного расположения входного и выходного валов. То же можно утверждать и касательно сил контакта звеньев. Причем указанные силы при параллельном расположении входного и выходного валов изменяются для разных пар контакта неодинаково.

Одним из методов достижения более равномерного распределения нагрузки и снижения кинематической погрешности является использование многопоточной схемы нагружения. По результатам компьютерных исследований многопоточного варианта эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов установлено, что максимальные значения нормальных контактных сил примерно в 5 раз, а кинематическая погрешность примерно в 12 раз ниже по сравнению с однопоточной схемой при нагрузке на выходном валу 10 Н·м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шанников, В.М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
2. Прецессионные редуцирующие механизмы для приводных устройств различного назначения / П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, Л.Г. Доконов и др.; под общ. ред. П.Н. Громыко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 270 с.
3. Разработка компьютерной модели для оценки основных показателей эксцентриковых передач с параллельным расположением входного и выходного валов / П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, С.Н. Хатетовский и др. // Транспорт. машиностроение. – 2022. – № 8(8). – С. 13–21.
4. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач / П.Н. Громыко, А.А. Жолобов, С.Н. Хатетовский и др.; под общ.ред. П.Н. Громыко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с.

#### REFERENCES

1. Shannikov, V.M. (1948). *Planetarnye reduktory s vnetsentroidnym zatsepleniem*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.)
2. Gromyko, P.N., Makarevich, D.M., Dokonov, L.G., Makarevich, S.D., Goncharov, P.S. & Trusov, I.V. (2013). *Pretsessionnyye redutsiruyushchie mekhanizmy dlya privodnykh ustroystv razlichnogo naznacheniya*. Mogilev: Belorussko-Rossiiskii Universitet. (In Russ.)
3. Gromyko, P.N., Makarevich, D.M., Khatetovskii, S.N. & Makarevich, A.S. (2022). Razrabotka komp'yuternoĭ modeli dlya otsenki osnovnykh pokazatelei ekscentrikovykh peredach s parallel'nym raspolozheniem vkhodnogo i vykhodnogo valov [Development of a computer model for assessing the main indicators of eccentric gears with a parallel arrangement of input and output shafts]. *Transportnoe mashinostroenie [Transport engineering]*, 8(8), 13–21. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Gromyko, P.N., Zholobov, A.A., Khatetovskii, S.N. & Galyuzhin, D.S. (2007). *Komp'yuternoe modelirovanie planetarnykh pretsessionnykh peredach*. Mogilev: Belorussko-Rossiiskii Universitet. (In Russ.)

Поступила 05.01.2024

**REDUCING THE KINEMATIC ERROR OF AN ECCENTRIC TRANSMISSION  
WITH A PARALLEL LOCATION OF INPUT AND OUTPUT SHAFT  
AS A RESULT OF THE APPLICATION OF A DOUBLE-FLOW LOADING SCHEME**

**P. GROMYKO, S. KHATETOVSKY, I. TRUSOV**  
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

*The article presents kinematic diagrams and computer analysis of three types of eccentric transmission schemes. The graphical dependences of the kinematic error of the eccentric transmission are presented for the coaxial and parallel arrangement of the input and output shafts in two single-flow loading schemes. Computer analysis of an eccentric transmission with single-flow loading schemes showed that the kinematic error with the coaxial arrangement of the input and output shafts is 30 times lower than with the parallel arrangement of these shafts. In order to reduce the kinematic error of an eccentric transmission with a parallel arrangement of input and output shafts, a two-flow loading scheme was proposed. It has been established that the use of a double-flow loading scheme makes it possible to reduce the kinematic error by 12 times compared to a single-flow loading scheme with a load on the output shaft of 10 N·m.*

*It is planned to use the design of an eccentric transmission with a parallel arrangement of input and output shafts with several power flows when designing various types of gearboxes for cultivators.*

**Keywords:** *eccentric gear with a coaxial arrangement of the input and output shafts, eccentric gear with a parallel arrangement of the input and output shafts, satellite, central wheel, computer model of the eccentric gear, two-flow loading scheme, kinematic error of the output shaft.*

## ТРАНСПОРТ

УДК 629.033

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-61-66

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ОБКАТКА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ПРИСАДОК К МАСЛУ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

На примере холодной стадии обкатки дизельного двигателя Д-245 на обкаточно-тормозном стенде КИ-2139Б при частоте вращения коленчатого вала обкатываемого двигателя в пределах  $700 \pm 10 \text{ мин}^{-1}$  установлено, что применение присадок к смазочным маслам позволяет сократить время обкатки в 1,5 раза. Холодная обкатка дизельных двигателей на ремонтном предприятии с применением масла М-10Г<sub>2</sub> с присадкой СУРМ КВ с ее содержанием 3,2–3,4% при температуре подаваемого масла 55–65 °С требует 60 мин. Использование присадки СУРМ КВ разрешает получить давления сжатия при проведении холодной обкатки такое же, как и при проведении горячей обкатки на холостом ходу по базовой технологии. Обосновано исключение режима горячей обкатки на холостом ходу из технологического процесса обкатки дизельных двигателей. Экономический эффект от внедрения специальных присадок в смазочный материал при обкатке двигателей внутреннего сгорания заключается в сокращении ее времени и уменьшении расхода топлива.

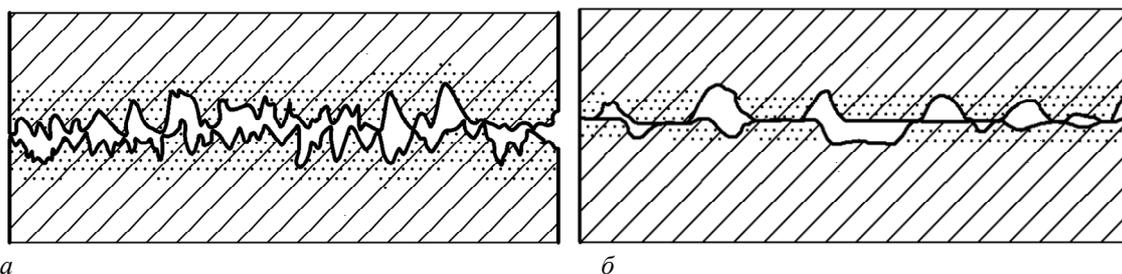
**Ключевые слова:** двигатель, обкатка, приработка соединений, смазочное масло, присадки, механические потери.

**Введение.** Сеть ремонтно-обслуживающих предприятий Республики Беларусь претерпела значительные изменения, оказавшие влияние на уровень технической готовности парка машин. Основные причины этого – существенное сокращение объемов работ по капитальному ремонту машин и агрегатов, выполняемых специализированными ремонтными предприятиями, переориентация отдельных ремонтных предприятий на выпуск продукции, уменьшение количества сложных ремонтно-обслуживающих воздействий [1].

Все автомобильные, тракторные и комбайновые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) в конце процесса их изготовления или ремонта обкатывают по установленному режиму разной продолжительности. Цель обкатки ДВС заключается в подготовке их к предстоящему использованию по назначению путем приведения в движение в управляемом режиме с выполнением некоторых работ небольшой трудоемкости. Обкатка агрегатов протекает, как правило, в две стадии. Первую стадию выполняют в конце их изготовления или ремонта на машиностроительном или ремонтном предприятии, вторую – в начале использования по назначению в условиях эксплуатационного предприятия.

Основное содержание обкатки агрегатов состоит в приработке трущихся поверхностей друг к другу, что обеспечивает в дальнейшем их работу с минимальным изнашиванием без схватывания, заедания и задиров. При обкатке происходит опрессовывание прокладок и резьб, а детали при этом занимают эксплуатационное положение.

Приработка трущихся соединений агрегата – самоорганизующийся процесс их начального изнашивания под действием управляемой нагрузки на трущиеся поверхности при установленной относительной скорости скольжения, что приводит к нужным изменениям как геометрических параметров этих поверхностей, так и физико-механических свойств материала поверхностных слоев. Изменения поверхностей трения выражаются тем, что контактирующие выступы шероховатости пластически деформируются, становятся более плоскими (рисунок 1), а их материал наклепывается.



*а* – в результате обработки резанием; *б* – приработки

Рисунок 1. – Схема строения соприкасающихся поверхностей

Изменяется вид кривой опорной поверхности (см. рисунок 1), а шероховатость поверхностей становится равновесной (устойчивой). Изменяются волнистость поверхностей и, в меньшей степени, их форма и расположение. Образуется новый микрорельеф. Изменяются также физико-механические свойства материалов поверхностных слоев: повышаются их твердость и внутренние напряжения в них, снижаются пластичность и коэффициент трения. Все это приводит к уменьшению силы трения, появлению устойчивого следа контакта на поверхностях трения, уменьшению и стабилизации температуры материала деталей и снижению скорости их изнашивания. Правильно организованная приработка трущихся соединений позволяет более полно использовать расчетный ресурс агрегатов.

Обработкой резанием при изготовлении и восстановлении деталей нельзя достичь комплекса геометрических параметров поверхностей и свойств поверхностных слоев, которые обеспечиваются приработкой соединений.

Таким образом, изменение свойств поверхностей трения во время приработки соединений происходит в основном за счет поверхностного пластического деформирования материала деталей. Исходное состояние поверхностей трения переходит в эксплуатационное. При этом: достигается шероховатость поверхностей трения, близкая к той, которая установится в последующей эксплуатации независимо от того, какой она была до сборки; частично исправляются погрешности формы и расположения элементов деталей; увеличивается площадь фактического контакта поверхностей в соединениях; устанавливается упругий контакт поверхностей, разделенных смазочным материалом, что приводит к их минимальному изнашиванию.

Начальная скорость изнашивания поверхностей, а, следовательно, и время приработки соединений зависят от свойств материалов трущихся поверхностей и взаимного их расположения, достигнутого при сборке, давления на поверхности контакта, скорости скольжения, температуры материала на поверхности трения и свойств смазочного масла.

Наибольшей износостойкостью при прочих равных условиях обладают детали в соединениях, когда получен нормативный зазор (обеспечено жидкостное трение), а упругое деформирование выступов шероховатости сочетается с разрушением когезионных связей между ними в тонких поверхностных слоях (правило положительного градиента). Связи между поверхностями трения легко разрушаются при нанесении на них более мягкого пластичного материала (приработочного покрытия) или образовании такого материала в результате взаимодействия смазки с основным материалом (избирательного переноса). Мягкий пластичный материал между трущимися поверхностями исключает схватывание поверхностей и вырывание материала из поверхностного слоя детали.

Обкатка ДВС связана с ее длительным протеканием (0,5–2,5 ч), большим расходом электроэнергии и эксплуатационных материалов. Важное значение имеет выбор рациональных нагрузочно-скоростных режимов, которые определяют не только качество приработки, но и последующую долговечность ДВС [2].

Существует четыре основных направления применения мероприятий для ускоренной приработки двигателей: использование специальных обкаточных масел; введение специальных присадок, содержащих органические вещества, в эксплуатационные масла; прямое введение в масло мелкодисперсной абразивной присадки; введение в зону трения электрического тока [3]. Исследования, проведенные как в нашей стране, так и за рубежом, показали, что одним из наиболее эффективных способов, позволяющих за короткое время, отводимое на заводскую обкатку, существенно улучшить и ускорить приработку соединений ДВС, является применение обкаточных масел с присадками<sup>1</sup> [4–6].

**Методы и материалы исследования.** В качестве объекта исследования был выбран дизельный двигатель Д-245. Исследована стадия холодной обкатки, которая выполнялась на обкаточно-тормозном стенде КИ-2139Б с электрической балансирной машиной АКБ 82-4 с фазным ротором установочными элементами под обкатываемые изделия и механизмом передачи крутящего момента. Стенд обеспечивает создание тормозной мощности до 150 л.с. и пределы регулирования частоты вращения ротора электромашин в режиме двигателя 500–1400 мин<sup>-1</sup>. Частота вращения коленчатого вала обкатываемого двигателя поддерживалась в пределах 700±10 мин<sup>-1</sup>.

В процессе обкатки измерялись температура входящего, подаваемого к масляному насосу, проточного масла и мощность, развиваемая электромашинной, приводящей в движение ДВС, соответствующая мощности механических потерь, а также давление газов в цилиндре в конце такта сжатия. Температура масла, реактивный момент на корпусе электромашин, частота вращения коленчатого вала и давление газов в цилиндре измерялись цеховыми приборами.

В качестве смазочного материала использовалось моторное масло М-10Г<sub>2</sub>, рекомендованное заводом-изготовителем – Минским моторным заводом. Наблюдалась работа двигателя как на чистом масле, так и на масле с присадками: Сурм КВ; Сурм УО; ТСКВ 100; Remetall; Practex; Newmen; Newmen 2 (таблица).

<sup>1</sup> Kock K.H. Computer aided tuning of digital controllers of the automation of engine test rigs // Predikt. and Simul. Serv. Cond. Conf. / London (22–23 May 2011). – London, 2011. – P. 81–90.

Порядок проведения лабораторных исследований и время контроля данных следующий. После подготовки стенда с установленным двигателем к запуску заливали масло, проверяли крепление всех соединений и запускали стенд. При проведении обкатки в течение 2 ч каждые 5 мин снимались показания: температуры масла, механических потерь на трение и давления газов в цилиндре, которые заносили в протокол эксперимента.

Таблица. – Характеристика используемых присадок

Наименование	Производитель	Назначение	Состав
Сурм КВ, Сурм УО	ООО «ПИОТР», Россия, Санкт-Петербург	Восстановление компрессии и давления масла в двигателе, а также работоспособности деталей трансмиссии и проведение ускоренной обкатки двигателей	Олово- и медьсодержащие компоненты
ТСКВ 100	ООО «ПИОТР», Россия, Санкт-Петербург	Снижение коэффициента трения, увеличение ресурса	Содержит редкие природные минеральные компоненты
Remetall	«ВМПАвто», Россия, Санкт-Петербург	Восстановление деталей двигателя за счет создания в зоне трения маслостойкой пористой структуры, защищающей детали от изнашивания	Присадка на основе порошков меди, олова и хрома
Practex, Newmen, Newmen 2	«NEWMEN», США	Увеличение срока службы агрегатов (до 5 раз), увеличение компрессии и мощности ДВС на 10–15%, уменьшение расхода топлива на 10–35%, увеличение срока службы масла минимум в 2 раза	Синтетическая присадка

**Основная часть.** О качестве приработки соединений чаще всего судят по изменению механических потерь на трение. Этот параметр удобен тем, что его измерение позволяет не прерывать обкатку двигателя. По мере приработки соединений потери на трение уменьшаются, при стабилизации потерь на трение мощность становится постоянной, что свидетельствует об окончании приработки.

Получены зависимости механических потерь от времени холодной обкатки двигателя Д-245 для выбранных присадок и масла М-10Г<sub>2</sub> (рисунок 2).

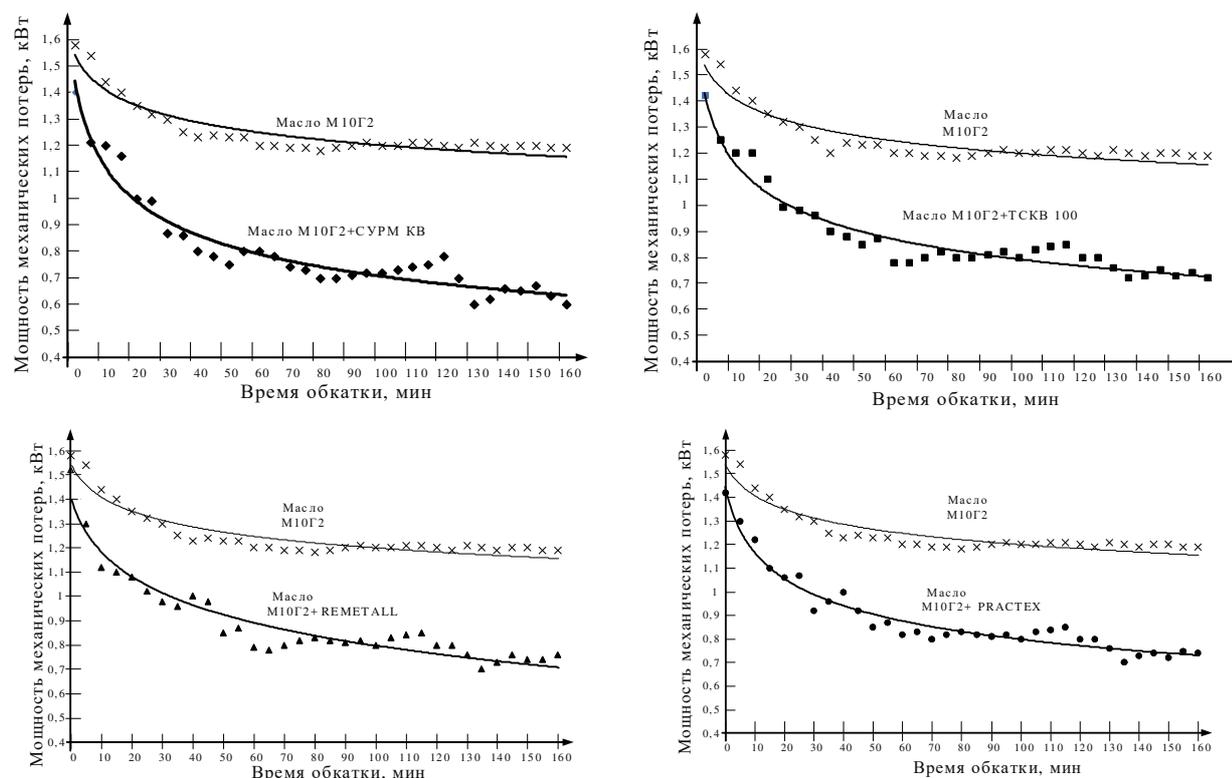


Рисунок 2. – Зависимости механических потерь от времени обкатки при работе на масле М-10Г<sub>2</sub> и композиции масла М-10Г<sub>2</sub> с присадками

Механические потери при применении присадки СУРМ КВ наиболее низкие. Режим обкатки устанавливается 60–70 мин, при применении других присадок не раньше 80–90 мин.

В начале обкатки ДВС температура масла повышается. По мере формирования оптимальной для данных условий микрогеометрии поверхностей происходит снижение и стабилизация температуры масла за счет уменьшения

шения температуры материала трущихся деталей. Динамика изменения температуры масла служит оценочным критерием качества приработки деталей.

Давление газов в конце такта сжатия свидетельствует о состоянии цилиндропоршневой группы ДВС. Разница показаний параметра в начале и конце обкатки характеризует степень приработки деталей этой группы. Было определено относительное увеличение давления газов при использовании чистого масла М-10Г<sub>2</sub> и его композиций с присадками (рисунок 3). По этому показателю на фоне остальных в лучшую сторону выделяются композиции из масла М-10Г<sub>2</sub> с присадками СУРМ КВ и Remetall.

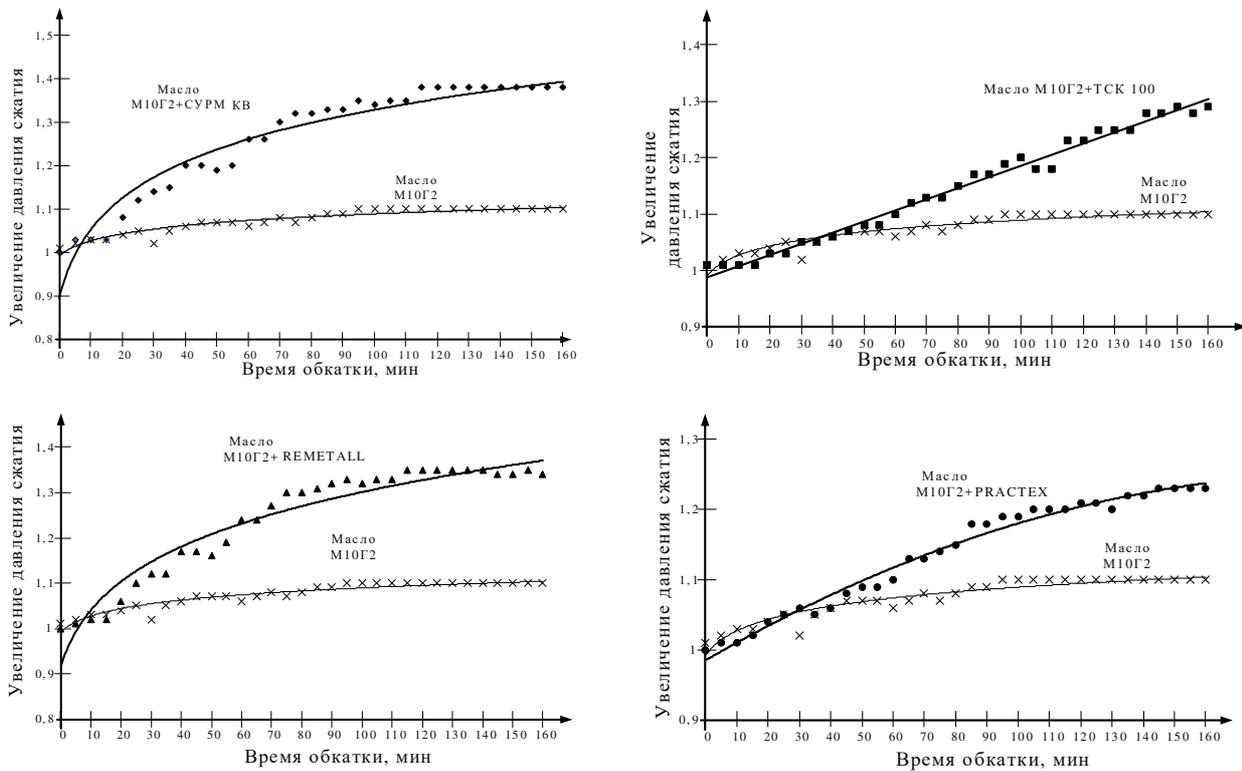


Рисунок 3. – Зависимости относительного увеличения давления в конце такта сжатия при холодной обкатке на масле М-10Г<sub>2</sub> и композиции М-10Г<sub>2</sub> с присадками

Во всех рассмотренных случаях наилучшие результаты обеспечивает присадка СУРМ КВ с ее содержанием в масле 3,2–3,4%. Влияние сочетания температуры подаваемого масла и времени обкатки на увеличение давления сжатия газов и механических потерь приведено на рисунках 4 и 5.

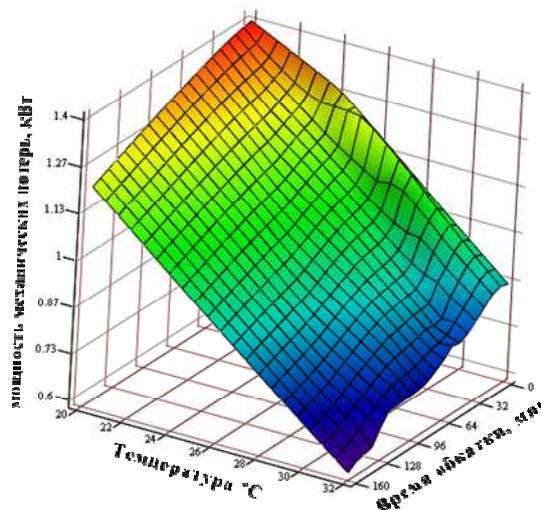


Рисунок 4. – Зависимость относительного увеличения давления сжатия газов от температуры подаваемого масла и времени обкатки

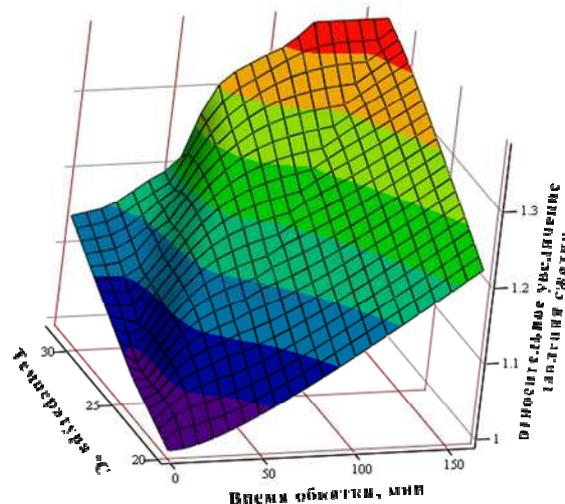


Рисунок 5. – Зависимость механических потерь от температуры подаваемого масла и времени обкатки

При исследовании температура подаваемого масла изменялась от 20 до 80 °С с интервалом в 10 °С. Оптимальной температурой подаваемого масла М-10Г<sub>2</sub> с присадкой СУРМ КВ при холодной обкатке дизельного двигателя Д-245 является температура в пределах 55–65 °С.

Для этого температура подаваемого масла изменялась от 20 до 80 °С с интервалом в 10 °С. Оптимальной температурой масла М-10Г<sub>2</sub> с присадкой СУРМ КВ для холодной обкатки дизельного двигателя Д-245 является температура в пределах от 55 до 65 °С.

**Заключение.** Применение присадок к маслам при проведении обкатки позволяет сократить время обкатки в 1,5 раза. Холодная обкатка дизельных двигателей на ремонтном предприятии с применением масла М-10Г<sub>2</sub> с присадкой СУРМ КВ с ее содержанием 3,2–3,4% при температуре подаваемого масла 55–65 °С требует длительности 60 мин.

Применение присадки СУРМ КВ позволяет получить давление сжатия при проведении холодной обкатки такое же, как и при проведении горячей обкатки на холостом ходу по базовой технологии. Поэтому возможно исключение режима горячей обкатки на холостом ходу из технологического процесса обкатки дизельных двигателей.

Экономический эффект от внедрения специальных присадок в смазочный материал при проведении обкатки двигателей внутреннего сгорания заключается в сокращении ее времени и уменьшении расхода топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевич В.К., Савич А.С., Иванов В.П. Технология производства и ремонта автомобилей. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2011. – 589 с.
2. Никифоров А.Д., Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении. – М.: Высш. шк., 2007. – 327 с.
3. Стрельцов В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей. – 2-е стер. изд. – М.: Колос, 1995. – 170 с.
4. Беднарский В.В. Организация капитального ремонта автомобилей. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 592 с.
5. Структура и свойства износостойких покрытий / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, А.Ф. Ильющенко и др.; под ред. П.А. Витязя. – Минск: Белор. гос. аграр. техн. ун-т, 2006. – 327 с.
6. Etude experimentale des relations entre frottement et usure dans moteurs a combustion interne / R. Ledus, J. Vaerman, R. De Craecker et al. // Ann. Inst. Beige petrole. – 2005. – № 4. – P. 9–15.

#### REFERENCES

1. Yaroshevich, V.K., Savich, A.S. & Ivanov, V.P. (2011). *Tekhnologiya proizvodstva i remonta avtomobilei*. Minsk: Adukatsyya i vykhavanne. (In Russ.)
2. Nikiforov, A.D., Kovshov, A.N. & Nazarov, Yu.F. (2007). *Vysokie tekhnologii razmerno obrabotki v mashinostroenii*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
3. Strel'tsov, V.V. (1995). *Resursosbergayushchaya uskorennaya obkatka otremonirovannykh dvigatelei*. Moscow: Kolos. (In Russ.)
4. Bednarskii, V.V. (2005). *Organizatsiya kapital'nogo remonta avtomobilei*. Rostov-on-Don: Feniks. (In Russ.)
5. Vityaz', P.A., Kozhuro, L.M., Il'yushchenko, A.F., Devoino, O.G. & Kardapolova, M.A. (2006). In P.A. Vityaz' (Ed.) *Struktura i svoystva iznosostoikikh pokrytii*. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi agrarnyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.)

6. Ledus, R., Vaerman, J., Craecker, R. De & Brille, G. De. (2005). Etude experementale des relations entre frottement et usure dans moteurs a combustion interne. *Ann. Inst. Beige petrole*, (4), 9–15.

Поступила 09.01.2024

**RESOURCE-SAVING RUN-IN OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES  
AT USE OF OIL MODIFYING ADDITIVES**

**V. IVANOV, T. VIGERINA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Using the example of the cold stage of running-in of a D-245 diesel engine on a running-brake stand KI-2139B at a crankshaft speed of the engine being run in within  $700 \pm 10 \text{ min}^{-1}$ , it was established that the use of additives to lubricating oils allows reducing the break-in time by 1,5 times. Cold running-in of diesel engines at a repair facility using M-10G2 oil with the SURM KV additive containing 3,2–3,4% at a supply oil temperature of 55–65 °C requires a duration of 60 minutes. The use of the SURM KV additive makes it possible to obtain compression pressures during cold running that are the same as during hot running at idle using the basic technology. The exclusion of the hot running-in mode at idle speed from the technological process of running-in diesel engines is justified. The economic effect of introducing special additives into the lubricant during running-in of internal combustion engines is to reduce its time and reduce fuel consumption.*

**Keywords:** *engine, running-in, running-in of joints, lubricating oil, additives, mechanical losses.*

УДК 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-67-70

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ГОРОДАХ**

*д-р техн. наук, проф. А.О. ЛОБАШОВ, д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ,  
С.С. СЕМЧЕНКОВ*

*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Обоснована актуальность темы исследования и дан краткий обзор разработанных ранее методов оценки влияния параметров транспортных сетей городов на характеристики транспортных потоков. Приведены полученные в результате исследований закономерности изменения скорости транспортных потоков в городах. Представлены разработанные математические модели изменения скорости транспортных потоков в зависимости от плотности транспортной сети города и уровня транспортного спроса.*

**Ключевые слова:** *скорость транспортного потока, транспортная сеть, математическая модель, транспортный спрос, уровень автомобилизации.*

**Введение.** Транспортная система города должна обеспечивать бесперебойное, безопасное, своевременное перемещение людей и грузов. Ее функционирование в значительной степени определяется параметрами транспортных сетей. Значения параметров транспортных потоков задаются как характеристиками транспортных средств, так и внешними факторами, к которым относится транспортная сеть города. Ее плотность зависит от типа планировочной структуры города и уровня развития городского транспорта. Кроме того, наблюдаемый в последние годы рост автомобильного парка, уровня автомобилизации городов также влияет на работу транспортных сетей.

В связи с этим сегодня существует необходимость изучения зависимости между параметрами городских транспортных сетей и характеристиками транспортных потоков. Скорость и время передвижения по транспортной сети – показатели, в значительной степени определяющие общее время перевозок грузов, пассажиров и, соответственно, эффективность работы транспортной системы города в целом.

На наш взгляд, проблема исследования закономерностей изменения скорости транспортных потоков в городах достаточно актуальна.

**Основная часть.** Исследованию закономерностей изменения параметров транспортных процессов в зависимости от характеристик транспортных сетей посвящено множество работ. К примеру, было исследовано влияние планировочной структуры города и площади его застроенной местности на уровень развития разных видов транспорта [1]. Однако данное исследование не затрагивает вопрос, как влияет транспортная сеть на основные характеристики транспортных потоков, параметры пассажирских и грузовых перевозок.

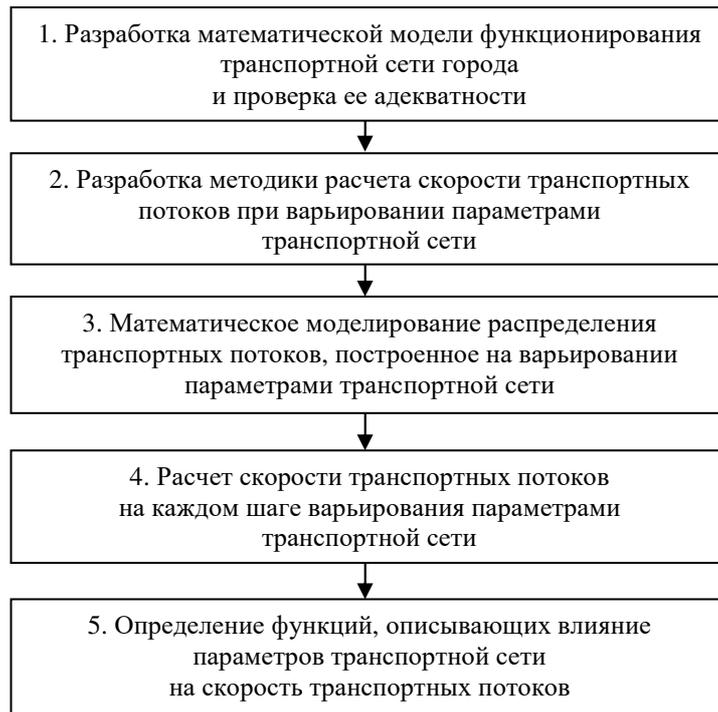
Согласно [2], разработаны рекомендации по уровню развития транспортных сетей городов по показателю линейной плотности. Кроме того, в данной работе проведен анализ характеристик эффективности различных планировочных структур городов. Они сравниваются по таким показателям, как коэффициент непрямолинейности, удельный вес дублирующих направлений движения, степень загрузки движением центра города, удельный вес сложных узлов и т.д. Несмотря на значимость данных исследований, они тоже не решают сформулированную проблему.

В работе [3] рассматриваются зависимости между параметрами дорожного движения и уровнем развития транспортной сети. В качестве показателя, характеризующего уровень развития транспортной сети, была принята удельная плотность транспортной сети. Представленные зависимости могут использоваться для оценки состояния дорожного движения в городе после внедрения мероприятий по реконструкции и развитию транспортной сети. Но данные зависимости не учитывают взаимосвязь параметров дорожного движения от уровня автомобилизации в городе. Поэтому представляется целесообразным изучение зависимости показателей эффективности и безопасности движения, а также получение закономерностей изменения скорости передвижения по транспортной сети города в зависимости от уровня ее развития и уровня автомобилизации в городе.

Исследование указанной зависимости выполнялось с помощью модели транспортных потоков [4]. Методика исследования базируется на моделировании распределения и параметров транспортных потоков в городе при варьировании удельной плотности транспортной сети и автомобилизации в городе. Исследования выполнялись для утреннего часа пик весенне-летнего сезона года в г. Харькове.

Исследование закономерностей влияния параметров транспортной сети на скорость транспортных потоков выполнялось в определенной последовательности. Для этого были использованы рекомендации, приведенные в [4]. В общем виде структурная схема методики исследования влияния параметров транспортной сети на скорость транспортных потоков представлена на рисунке 1.

На первом этапе данной методики (см. рисунок 1) была разработана компьютерная модель функционирования транспортной сети города. Выполненная проверка адекватности модели показала приемлемые результаты. Средняя ошибка аппроксимации составила 8,14%.



**Рисунок 1.** – Структурная схема методики исследования влияния параметров транспортной сети на скорость транспортных потоков

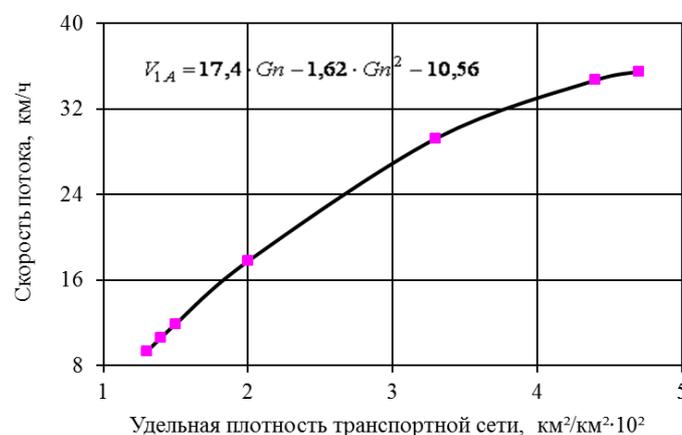
Следующим шагом стала разработка методики расчета скорости транспортных потоков при варьировании параметрами транспортной сети. Данная методика предполагает расчет скорости транспортных потоков на отдельных участках транспортной сети. Затем на основании полученных данных будет рассчитана средняя скорость передвижения по транспортной сети города.

На третьем этапе выполняется математическое моделирование распределения транспортных потоков, построенное на варьировании параметрами транспортной сети. На каждом шаге варьирования параметрами транспортной сети производится распределение транспортных потоков.

После моделирования распределения транспортных потоков был получен достаточный объем статистики изменения скорости транспортных потоков (этап 4). Согласно статистике, проявляется взаимосвязь параметров транспортной сети и скорости транспортных потоков на городских улицах.

На заключительном – пятом – этапе определялись вид и параметры функций, описывающих влияние параметров транспортной сети на скорость транспортных потоков.

Реализация методики (см. рисунок 1) позволила определить параметры математических моделей влияния параметров транспортной сети на скорость транспортных потоков. На рисунках 2 и 3 представлены однофакторные модели изменения средней скорости передвижения по транспортной сети.



**Рисунок 2.** – Зависимость скорости транспортного потока ( $V_{1,А}$ ) от удельной плотности ( $Gn$ ) транспортной сети

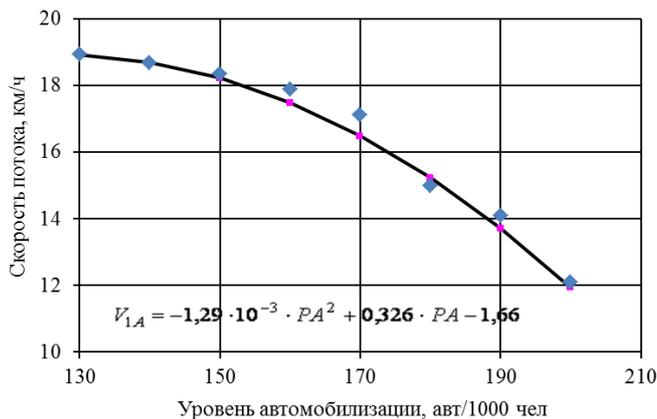


Рисунок 3. – Зависимость скорости транспортного потока (V1A) от уровня автомобилизации (PA)

Данные модели характеризуются удовлетворительной теснотой связи между зависимыми и независимыми переменными. Для модели, представленной на рисунке 2, средняя ошибка аппроксимации составила 6,7%; для модели, представленной на рисунке 3, – 8,2%.

Обработка полученной статистики позволила рассчитать параметры двухфакторной модели изменения средней скорости передвижения по транспортной сети города. Зависимость (рисунок 4) была получена по результатам моделирования распределения транспортных потоков при одновременном варьировании двумя факторами.

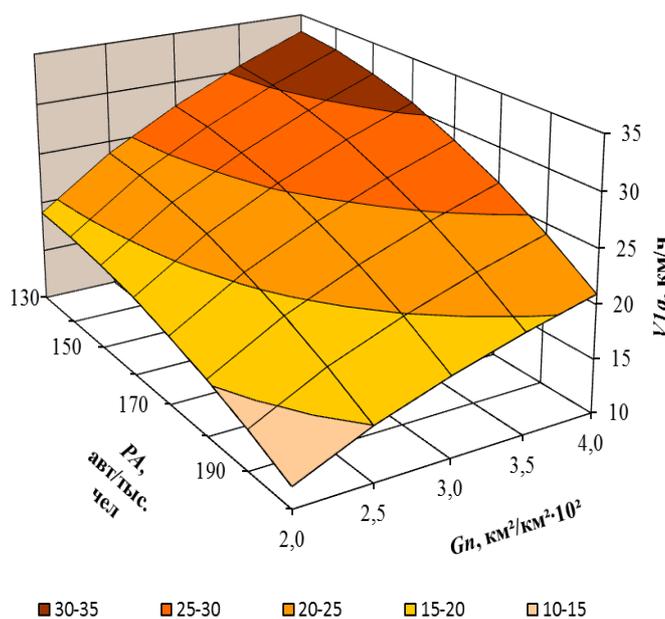


Рисунок 4. – Зависимость скорости транспортного потока (V1A) от плотности транспортной сети (Gn) и уровня автомобилизации (PA)

Данная зависимость имеет также удовлетворительные статистические характеристики. Коэффициент корреляции составил 0,92, средняя ошибка аппроксимации – 9,8%.

**Заключение.** Результаты представленного исследования позволили сделать ряд выводов о перспективах изменения скорости транспортных потоков в городах. В частности, при сохранении существующих темпов развития транспортной сети города через 20–25 лет произойдет уменьшение средней скорости передвижения на 35–38%, увеличение среднего времени передвижения на 68–70%.

Для сохранения существующих условий движения в городах, с учетом тенденций роста уровня автомобилизации, необходимо обеспечить ежегодный рост плотности транспортной сети на 3%.

Представленные регрессионные модели изменения скорости транспортных потоков в городах адекватны и пригодны для использования при решении различных задач повышения эффективности функционирования транспортных систем городов.

В дальнейшем данные модели могут использоваться для прогнозирования параметров перевозок грузов и пассажиров в городах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: [пер. с англ.] / В.У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
2. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
3. Estimating the Parameters of Traffic Flows on the Basis of Processing of Localization Data on the Movement of Vehicles / D. Kapski, V. Kasyanik, O. Lobashov // Communications – Scientific letters of the University of Zilina. – 2019. – Т. 21, №. 2. – P. 89–99. DOI: 10.26552/com.C.2019.2.89-99
4. Establishing Patterns of the Urban Transport Flows Functioning On Urban Network Parameters / D. Burko, O. Lobashov, O. Prasolenko et al.// Transportation Research Procedia. – 2020. – Vol. 48. – P. 793–800. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.082

## REFERENCES

1. Rankin, V.U., Claffey, P., Halbert, S. & Zhuleva, V.I. (1981). *Avtomobil'nye perevozki i organizatsiya dorozhnogo dvizheniya*. Moscow: Transport. (In Russ.)
2. Lobanov, E.M. (1990). *Transportnaya planirovka gorodov*. Moscow: Transport. (In Russ.)
3. Kapski, D., Kasyanik, V., Lobashov, O., Volynets, A., Kaptsevich, O. & Galkin, A. (2019). Estimating the Parameters of Traffic Flows on the Basis of Processing of Localization Data on the Movement of Vehicles. *Communications – Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), 89–99. DOI: 10.26552/com.C.2019.2.89-99
4. Burko, D., Lobashov, O., Prasolenko, O., Gyulyev, N. & Kumar, C. (2020). Establishing Patterns of the Urban Transport Flows Functioning On Urban Network Parameters. *Transportation Research Procedia*, (48), 793–800. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.082

Поступила 10.01.2024

## PATTERNS OF SPEED CHANGES TRAFFIC FLOWS IN CITIES

**A. LOBASHOV, D. KAPSKY, S. SEMCHENKOV**  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The relevance of the research topic is substantiated and a brief review of previously developed methods for assessing the influence of the parameters of urban transport networks on the characteristics of traffic flows is given. The patterns of changes in the speed of traffic flows in cities obtained as a result of research are given. The developed mathematical models of changes in the speed of traffic flows depending on the density of the transport network of the city and the level of transport demand are presented.*

**Keywords:** traffic flow speed, transport network, mathematical model, transport demand, motorization level.

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78

## АКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ СЛОЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

*д-р. техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ*

*(Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой)*

*Отражены вопросы активного мониторинга и диагностирования технического состояния мобильной машины, оснащенной гидромеханической трансмиссией. Рассмотрены факторы, влияющие на снижение КПД машины и ухудшение работоспособности трансмиссии. Отмечено, что основными процессами, способствующими утрате работоспособности гидромеханической трансмиссии, являются трение и изнашивание рабочих поверхностей деталей и их сопряжений; усталостные процессы в деталях, подверженных действию переменных нагрузок; старение материалов. Названы причины возникновения дефектов и характер их проявления в гидромеханических трансмиссиях, даны мероприятия по непрерывному и активному мониторингу неисправностей в автоматических коробках передач. Установлено, что для проведения активного мониторинга автоматизированных механических и гидромеханических трансмиссий, имеющих сложные элементы взаимодействия зубчатых передач, необходимо получить взаимозависимости между диагностическими параметрами и критериями оценки технического состояния для того, чтобы данную информацию реализовать в алгоритмах мониторинга и диагностики мобильного применения.*

**Ключевые слова:** гидромеханическая передача, мобильная машина, техническое состояние, мониторинг.

**Введение.** Транспортные средства (ТС) и мобильные машины (ММ) широкого назначения (карьерные автомобили-самосвалы, шахтные землевозы, строительно-дорожная техника, тракторы, погрузчики и др.) включают в себя трансмиссии, основные элементы которых – механические и гидромеханические передачи. Взаимодействующие друг с другом звенья и элементы этих механизмов являются принадлежностью валовых и планетарных коробок передач, которые неизбежно подвергаются знакопеременным нагрузкам и тепловым напряжениям. Для эффективного выполнения мобильными машинами, оборудованными такими передачами, транспортной работы, повышения ресурса и обеспечения работоспособности необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать техническое состояние этих сложных передач, т.е. осуществлять активный мониторинг.

Многие мобильные машины оснащены гидромеханическими трансмиссиями (ГМТ). Условия эксплуатации ММ с ГМТ являются настолько сложными и многообразными, что существует большая проблема повышения ресурса машин и обеспечения долговечности их механизмов. Долговечность этих машин, т.е. их способность длительное время сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации, определяется двумя основными условиями: физическим либо моральным износом. Физический износ наступает в том случае, когда дальнейший ремонт и эксплуатация машин и их важнейших механизмов становятся уже невыгодными, т.к. затраты превышают доход в эксплуатации. Моральный износ означает несоответствие параметров машины современным условиям их эксплуатации.

**Основная часть.** Для обеспечения надежности сложных гидромеханических передач и повышения КПД механизмов необходимо обязательное изучение функциональных взаимосвязей элементов в структуре объекта с учетом всего комплекса внешних воздействий. Важную роль при этом играют характеристики механизмов отказов, а также моделирование физических процессов и получение зависимостей, что позволяет анализировать состояние работоспособности элементов. На снижение КПД машины и ухудшение работоспособности ГМТ оказывают влияние внешние и внутренние факторы. К ним относится ряд явлений, которые определяются физико-механическими (деформация, разрушение, разрегулирование, износ и др.), химическими (коррозия, разъедание, диффузия и т.д.), тепловыми (деструкция, перегрев) процессами, протекающими с разной скоростью как независимо друг от друга, так и во взаимосвязи в результате внешних воздействий и внутренних процессов [1].

Анализ состояния работоспособности ГМТ в зависимости от условий функционирования и выбранных оценочных критериев производится с использованием известных теоретических положений по оценке износа деталей, их прочности, герметичности и работоспособности гидравлических устройств.

Для современных сложных гидравлических систем понятие «отказ» не полностью приемлемо. Оно достаточно полно характеризует нарушение работоспособности отдельных элементов и устройств. В сложной разветвленной системе с избыточностью отказ отдельных элементов еще не приводит к отказу всей системы. Чаще его последствия проявляются в снижении эффективности функционирования системы, хотя накопление отказов отдельных элементов, а также воздействие поврежденных деталей на зависимые и связанные с ними элементы могут приводить к полной потере работоспособности всей системы.

Многочисленные исследования и результаты эксплуатационных испытаний подтверждают, что в процессе эксплуатации неисправностям чаще всего подвержены насосы, исполнительные гидравлические устройства, регулирующая аппаратура, фильтры и трубопроводы.

При эксплуатации ММ с ГМТ происходят изменения физических свойств и состояний материала деталей. В результате этого гидравлические и гидротехнические устройства, входящие в состав ГМТ, даже в усло-

виях нормальной эксплуатации ММ подвергаются износу и отказам, снижая тем самым надежность и работоспособность.

Опыт исследований и эксплуатации мобильных машин различного назначения, в частности, карьерной техники, показывает, что основными процессами, способствующими утрате работоспособности ГМТ, являются трение и изнашивание рабочих поверхностей деталей и их сопряжений; усталостные процессы в деталях, подверженных действию переменных нагрузок; старение материалов [1; 2].

Условия протекания процессов в ГМТ ММ в значительной степени зависят как от случайных внешних воздействий, так и от режимов работы механических устройств и гидравлических аппаратов. При этом изменение характеристик этих устройств зачастую подчиняется статистическо-вероятностным зависимостям.

Следуя положениям механики разрушений, длительность времени  $t$ , необходимого для разрушения твердого тела, в частности, картера коробки передач и корпусных деталей, определяется по следующей зависимости:

$$t = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \zeta \sigma_p}{KT_p}\right), \quad (1)$$

где  $U_0$  – энергия активации процесса разрушения для данного материала, Дж;  $\zeta$  – постоянная, близкая к периоду тепловых колебаний;  $\sigma_p$  – разрушающее напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $K$  – постоянная Больцмана,  $K = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град;  $T_p$  – температура в области разрушения, град.

Для анализа напряжений, приводящих к короблению фрикционных дисков ГМТ вследствие повышения термических напряжений, можно воспользоваться выражением

$$\sigma = \frac{2E\delta_d\varphi}{r_B + r_H}, \quad (2)$$

где  $r_B$  и  $r_H$  – внутренний и наружный радиусы диска, м;  $E$  – модуль упругости;  $\delta_d$  – толщина диска, м;  $\varphi$  – угол поворота сечения диска под воздействием разности тепловых расширений диска с нагреваемой и ненагреваемой сторон, определяемый по формуле, экспериментально полученной в заводских условиях при исследовании на стендах фрикционных дисков:

$$\varphi = \frac{2r_B\Delta T}{\delta_d}, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – разность между температурой на поверхности и минимальной температурой диска.

Прогиб  $f$  при короблении диска, вызванный изменением площади контакта и радиальным перепадом температур, для случая несимметричного нагрева вычисляется по формуле

$$f = \varphi(r_H - r_B). \quad (4)$$

Рассмотрим процессы, происходящие при износе элементов гидравлических приводов (ГП), а также деталей коробок передач гидромеханических и механических трансмиссий.

Важными элементами, влияющими на надежность ММ с ГМТ, являются уплотнительные элементы гидравлических аппаратов, насосов, сопряженных деталей ГП. В связи с этим даже небольшой по абсолютной величине износ деталей приводит к потере герметичности и преждевременному выходу из строя устройства в целом.

На основе изучения различных пар трения механических и гидромеханических устройств мобильной машины можно выделить несколько характерных классов этих сопряжений (таблица 1).

Классификация видов пар трения механических и гидромеханических устройств позволяет более обоснованно подходить к имитационному моделированию условий работы трансмиссии, что важно на стадии проектирования передач, а также помогает выбирать рациональные схемы обеспечения надежности и повышения КПД и работоспособности ГМТ.

Кроме общего требования минимальной силы трения между сопрягаемыми элементами к ним предъявляется требование обеспечения надежной герметизации, что обуславливается функциональными особенностями гидравлических механизмов и спецификой их работы. Для учета этих противоречивых требований необходимо четко представлять механизм износа в таких элементах и прогнозировать закономерности его протекания.

В механических и гидромеханических трансмиссиях «слабыми звеньями» являются зубчатые зацепления. Рассмотрим основные виды дефектов зубчатых передач трансмиссий мобильных машин<sup>1</sup> [3].

<sup>1</sup> Рынкевич С.А. Концептуальные основы диагностики гидрофицированных трансмиссий карьерной техники // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы междунар. конф. / Тюмень (1 февр. 2018 г.) / отв. ред. Ш.М. Мерданов. – Тюмень, 2018. – С. 237–241.

Таблица 1. – Классы сопряжений элементов для анализа износа в ГМП

Класс 1	Схема взаимодействия 2	Вид сопряжения и типы элементов 3
<i>1 Пара трения с концентричным зазором</i>		
1.1 Перемещение одного элемента вдоль оси при неподвижном другом		Элементы насосов; плунжер-корпус золотника; поршень-цилиндр; шток-элемент уплотнения
1.2 Вращение одного элемента вокруг общей оси при неподвижном другом		Элементы вал-корпус насосов; контрольно-регулирующих устройств
1.3 Перемещение с изменением концентричного зазора между элементами		Поршневые кольца-гильза цилиндра; упругие уплотнительные кольца (манжеты); вали (штоки); детали самоуплотняющихся элементов насосов
<i>2 Парты трения с касанием по плоским поверхностям</i>		
2.1 Перемещение одного элемента в своей плоскости, другой – неподвижен или перемещается в другой плоскости		Элементы плоских золотников; поршневые кольца-стенки канавок поршней
2.2 Пары трения с соприкасающимися поверхностями, представляющими параллельные стенки кольцевой формы, из которых одна вращается в своей плоскости, а другая неподвижна		Элементы торцового распределения насосов; торцовые уплотнения гидроаппаратов
2.3 Одна из поверхностей трения имеет возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к плоскости своего размещения		Уплотнительные и распределительные элементы гидравлических устройств с гидрокомпенсацией зазоров
<i>3 Пары трения с касанием взаимодействующих деталей по поверхностям сложных форм</i>		
3.1 Пары с перекачиванием и переменным проскальзыванием деталей в контакте		Зацепление шестерен в шестеренном насосе
3.2 Пары с прерывистым движением деталей в различных плоскостях		Элементы клапанов (шарик-гнездо корпуса), дросселей

Зубчатые передачи как ответственные элементы трансмиссий работают в условиях высоких ударных и вибрационных нагрузок в широком диапазоне температур. В зависимости от конструкции ММ или ТС влияние различных факторов на надежность и долговечность трансмиссии в целом и зубчатых зацеплений в частности изменяется в широких пределах. Для разработки алгоритмов диагностики и мониторинга сложных звеньев и зубчатых зацеплений полезно знать, какие дефекты возникают в процессе эксплуатации ММ, каким образом они влияют на характеристиках передач и какова опасность их для дальнейшей эксплуатации трансмиссии.

Анализ показал, что работа практически любой зубчатой передачи сопровождается таким явлением, когда зубья, проходя зону зацепления, ввиду воздействия знакопеременных нагрузок подвергаются циклическому нагружению. При этом на контактирующих поверхностях зубьев действуют нормальная к ним сила и сила трения. Для каждого зуба напряжения варьируются во времени по прерывистому отнулевому циклу. Повторно-переменные нагружения являются причиной усталостного разрушения зубьев – это их поломки или выкрашивания рабочих поверхностей.

Скольжение и силы трения в зацеплении вызывают ряд дефектов, самыми распространенными из которых являются изнашивание и заедание зубьев. При изнашивании рабочих поверхностей зубьев изменяется исходный эвольвентный профиль, а значит, изменяется направление силовых реакций на подшипники. Увеличиваются зазоры в зубчатом зацеплении, вызывающие дополнительные динамические нагрузки на зубья.

Рассмотрим подробнее причины возникновения дефектов и характер их проявления в период эксплуатации ТС или ММ.

*Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев* (рисунок 1, а) является основным видом разрушения зубьев для большинства зубчатых передач. На ножке зуба вблизи полюсной линии действуют наибольшая нагрузка и большая сила трения, что вызывает разрушительные знакопеременные напряжения. Этот процесс содействует образованию микротрещин на поверхности зубьев. Развитию трещин способствует также расклинивающий эффект смазочного материала, который проникает в трещины зубьев. В результате происходит выкрашивание частиц материала с поверхности, при этом образуются мелкие ямки, из которых зарождаются более крупные раковины на целой поверхности зубьев. К быстрому износу и задиру зубьев приводит такое явление, как нарушение условия образования сплошной масляной пленки из-за того, что масло выжимается в ямки. В итоге возрастают динамические нагрузки, возникают шум и вибрация, повышается температура.

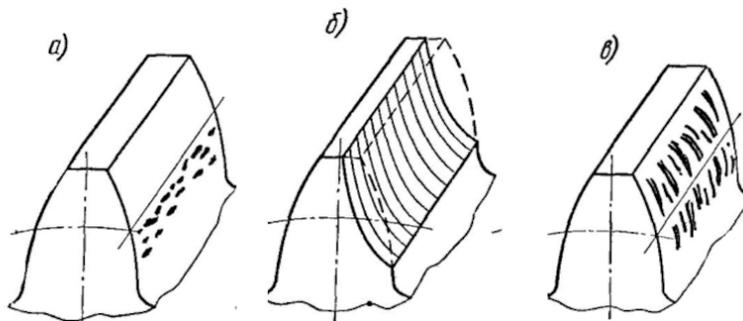


Рисунок 1. – Виды дефектов зубьев

Для предотвращения выкрашивания рекомендуется повышать твердость поверхности зубьев, уменьшать шероховатость рабочих поверхностей, выбирать требуемые сорта масла.

*Изнашивание зубьев* – основной вид разрушения зубьев открытых передач (см. рисунок 1, б). Интенсивность изнашивания зависит от скоростных и нагрузочных режимов работы передачи, а также условий смазки. По мере изнашивания ослабляется ножка зуба, он становится тоньше, увеличиваются зазоры в зацеплении. Все это приводит к потере кинематической точности и в дальнейшем к поломке зубьев.

При правильной эксплуатации трансмиссии изнашивание зубьев будет равномерным. Неравномерность износа зубьев по диаметру делительной окружности может быть вызвана смещением делительного диаметра зубчатого колеса по отношению к оси его вращения или прогибом вала, на котором закреплено зубчатое колесо.

В гидромеханических трансмиссиях коробки передач снабжены фрикционными муфтами, поэтому неравномерное изнашивание зубьев возможно при износе поверхностей качения подшипников, на которых размещены ведомые зубчатые колеса. Ось вращения зубчатого колеса при возникновении зазора в подшипнике смещается, и при замыкании фрикциона происходит неравномерный износ зубьев по диаметру делительной окружности.

Для уменьшения изнашивания необходимо обеспечить защиту от попадания абразивных частиц, можно повысить твердость и снизить шероховатость рабочих поверхностей зубьев, а также за счет модификации уменьшить скольжение зубьев.

*Заедание зубьев* (см. рисунок 1, в) заключается в эффекте микросварки, т.е. приваривании частиц материала одного зуба к другому. При этом разрушается смазочная пленка из-за местного нагрева, что происходит вследствие высоких давлений и скоростей скольжения в зоне контакта. Оторвавшиеся наросты на зубьях задирают рабочие поверхности сопряженных зубьев, бороздя их в направлении скольжения. Заедание зубьев предупреждают повышением твердости, понижением шероховатости рабочих поверхностей зубьев, применением модификации, подбором противозадирных масел, искусственным охлаждением передачи. Заедание является наиболее опасным видом отказа тяжело нагруженных зубчатых передач.

В процессе автоматизации трансмиссий современных транспортных средств следует создавать адаптивные алгоритмы управления и диагностирования для бортовых электронных систем, которые учитывают в режиме реального времени большой объем информации различной физической природы. На современном этапе такие алгоритмы должны быть наделены интеллектуальными качествами, обеспечивая функции управления, контроля и мониторинга в совокупности трансмиссий и других механизмов мобильных машин на высоком уровне [3].

*Дефекты зубьев муфт переключения передач.* Зубчатые муфты (ЗМ) коробок передач представляют собой съемные жесткие муфты, при этом используется внутреннее и внешнее сцепление зубьев для передачи крутящего момента и вращательного движения между двумя половинами муфты. ЗМ выполняют с прямыми зубьями, имеющими наиболее технологичный эвольвентный профиль. Для обеспечения небольшого хода вилок переключения передач стремятся уменьшить длину зубьев муфты за счет увеличения ее диаметра.

Зубья муфт переключения передач с течением времени подвергаются износу. Изнашивание происходит как по боковым поверхностям зубьев, так и по заходным кромкам зубьев ведущих и ведомых зубчатых полу муфт (рисунок 2). При изнашивании или разбивании заходных кромок зубьев изменяется их конфигурация, что затрудняет поворот запирающего звена после синхронизации угловых скоростей и перемещение подвижной полу муфты для ее включения.

Причиной затруднения включения передачи могут быть и поломки как зубьев блокирующего кольца, так и зубьев ведомых или ведущих полу муфт.



**Рисунок 2. – Конфигурация заходных кромок и форма боковых поверхностей зубьев подвижной зубчатой полу муфты**

*Дефекты фрикционных муфт.* В качестве элементов управления в современных вальных и планетарных коробках передач применяются работающие в масле многодисковые фрикционные муфты (ФМ) и тормоза с гидравлическим управлением. Их преимущества: высокая энергоемкость, обеспечивающая передачу большой мощности при относительно малых размерах; плавность изменения момента трения, реализуемая подбором определенного числа дисков; отсутствие необходимости в регулировке зазоров между поверхностями трения; способность передавать вращающий момент в любом направлении; отсутствие радиальных сил, нагружающих валы и их опоры при передаче момента; высокое быстродействие. Недостатки: невозможность полного выключения и, как следствие, необходимость в постоянном подводе рабочей жидкости к поверхностям трения для смазки и охлаждения, что снижает общий КПД трансмиссии; зависимость момента трения от угловой скорости вращения фрикциона из-за действия центробежных сил жидкости, находящейся внутри силового цилиндра.

Многодисковые фрикционные муфты ГМТ работают в довольно сложных условиях, поэтому подвержены ряду дефектов. Рисунок 3 иллюстрирует поломки зубьев блокирующего кольца и ведущей полу муфты.

Некоторые фирмы применяют не плоские, а волнистые фрикционные диски. Высота волны делается обычно 0,3–0,5 мм. Это дает возможность уменьшить суммарную поверхность трения дисков в выключенном состоянии, что снижает потери крутящего момента. Кроме того, такие диски позволяют улучшить плавность включения. Ведущие диски ФМ выполняют из высокоуглеродистых сталей, а ведомые имеют накладки из фрикционных материалов. К материалу фрикционных накладок предъявляются особые требования: высокий и стабильный коэффициент трения; необходимые теплоемкость, теплопроводность, износостойкость и плавность включения, а также прочность соединения со стальной основой диска.

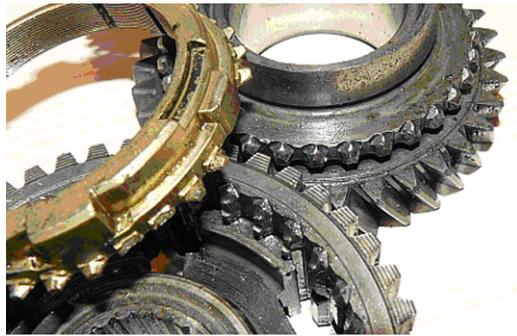


Рисунок 3. – Поломки зубьев блокирующего кольца и ведущей полумуфты

Наиболее широко применяются металлокерамические фрикционные материалы на медной или железной основе, обладающие стабильным коэффициентом трения и высокой износостойкостью, не вызывающие задиоров и схватывания с сопряженной поверхностью, допускающие высокие нагрузки. Толщина металлокерамического слоя составляет 0,25–3 мм. Рабочие поверхности дисков имеют систему каналов, обеспечивающих подвод масла к поверхности трения, отвод тепла и удаление продуктов изнашивания.

Основные дефекты фрикционных муфт: коробление фрикционных дисков от перегрева, вызывающее увеличение остаточного момента трения в выключенных фрикционах; спекание фрикциона при длительном буксовании; износ и отслаивание фрикционных материалов от стальной основы; трещины и поломки дисков; нарушение герметичности нажимных цилиндров; поломка отжимных пружин; деформации шлицев ведущей и ведомой частей фрикционов или их разрушение. Эти дефекты проявляются как металлические шумы и скрежет при переключении передач; рывки при переключении, вызывающие дергание машины; часто возникающая пробуксовка автомобиля, иногда автомобиль не может тронуться с места и его самостоятельное движение невозможно.

*Коробление дисков фрикционов.* Циклический характер процесса функционирования фрикциона приводит к интенсивным повышениям температуры поверхностей трения при включении и постепенном их охлаждении по окончании процесса буксования. Зачастую за промежуток времени между включениями диски не успевают остыть до начальной температуры. При этом максимальная и средняя температуры поверхностей трения будут неуклонно возрастать с каждым последующим включением и могут достигать недопустимо высоких значений, что приведет к короблению дисков (рисунок 4). Стрелками показан характер искривленной при короблении поверхности диска.

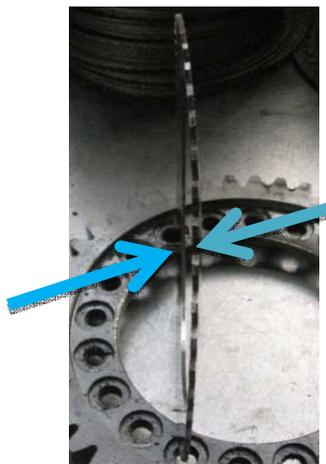


Рисунок 4. – Коробление диска

Коробление дисков ФМ возможно при снижении давления сжатия пакета дисков вследствие утечек через уплотнительные кольца валов, герметизирующего подвижное соединение гидравлических магистралей управления фрикционами или повышенных зазоров в самих гидроцилиндрах фрикционов. В этом случае при передаче больших крутящих моментов возможно длительное буксование фрикционов, которое может привести не только к перегреву и короблению дисков, но и их спеканию.

Коробление дисков ФМ приводит к возрастанию остаточного момента трения в выключенных фрикционах, что сказывается на КПД трансмиссии, к перекоосу и заеданию дисков на шлицах ведомой или ведущей полумуфт (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Заедание покоробленного диска на шлицах фрикционной муфты**

Происходит однобокое истирание фрикционного слоя, находящегося в постоянном контакте с покоробленным диском (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Односторонний износ фрикционного слоя ведомого диска**

Следствием коробления дисков является увеличение времени буксования ФМ при включении, а также уменьшение передаваемого крутящего момента из-за потери давления на выравнивание пакета дисков для создания необходимой силы трения, увеличение момента поводок в выключенном фрикционе.

Внешними проявлениями коробления дисков фрикциона являются повышенный остаточный момент трения (момент поводок), вызывающий движение автомобиля при выключенных передачах, заглохание двигателя на режиме холостого хода и «нейтрали» в коробке передач.

**Заключение.** Для проведения активного мониторинга автоматизированных механических и гидромеханических трансмиссий, имеющих сложные элементы взаимодействия зубчатых передач, необходимо получить взаимозависимости между диагностическими параметрами и критериями оценки технического состояния, для того чтобы данную информацию реализовать в алгоритмах мониторинга и диагностики мобильного применения, т.е. средствами бортовой микроэлектроники. На предварительном этапе на основе всестороннего изучения физических процессов, приводящих к дефектам и неисправностям элементов коробок передач, выявляют закономерности и тенденции развития дефектов, что позволяет прогнозировать работоспособное состояние и обеспечить повышение ресурса мобильной машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Д.В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.
2. Рынкевич С.А. Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние проблемы и перспективы развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 77–88.
3. Рынкевич С.А. Методология проектирования подвижных объектов // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 130–153.

## REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2020). Avtomatizatsiya diagnostirovaniya mekhanicheskikh i gidromekhanicheskikh transmissii [Diagnostic automation mechanical and hydromechanical transmissions]. In D. Kapskii (Ed.). *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport*: Vol. 1, (46–50). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Rynkevich, S.A. (2021). Upravlenie i diagnostirovanie gidrofitsirovannykh transmissii: sostoyanie problemy i perspektivy razvitiya [Control and diagnosis of hydraulic transmissions: state of the problem and prospects for development]. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* (77–88). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Rynkevich, S.A. (2018). Metodologiya proektirovaniya podvizhnykh ob"ektov [Methodology for designing moving objects]. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* (130–153). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 11.11.2023

**ACTIVE MONITORING OF COMPLEX ELEMENTS OF HYDROMECHANICAL TRANSMISSIONS  
OF MOBILE MACHINES**

**S. RYNKEVICH**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The issues of active monitoring and diagnosing the technical condition of a mobile machine equipped with a hydromechanical transmission are reflected. The factors influencing the decrease in machine efficiency and the deterioration of transmission performance are considered. It is noted that the main processes contributing to the loss of performance of a hydromechanical transmission are friction and wear of the working surfaces of parts and their interfaces; fatigue processes in parts subject to variable loads; aging of materials. The causes of defects and the nature of their manifestation in hydromechanical transmissions are given, as well as measures for continuous and active monitoring of faults in automatic transmissions. It is noted that in order to carry out active monitoring of automated mechanical and hydromechanical transmissions that have complex elements of gear interaction, it is necessary to obtain interdependencies between diagnostic parameters and criteria for assessing the technical condition in order to implement this information in monitoring and diagnostic algorithms for mobile applications.*

**Keywords:** *hydromechanical transmission, mobile machine, technical condition, monitoring.*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ЯЧЕЕК ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ***канд. техн. наук, доц. А.С. ГУРСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены способ и устройство дистанционной диагностики ячеек высоковольтной аккумуляторной батареи (ВАКБ) электрических автотранспортных средств. Полученные данные могут быть использованы при диагностировании электрических автотранспортных средств, а также при их конструировании, техническом обслуживании и ремонте. Совершенствование дистанционной диагностики отдельных ячеек и всей ВАКБ путем интегрирования преобразованных данных во внутреннюю сеть данных и передачи на сервер телематических услуг с последующей обработкой данных позволит оперативно выявлять проблемные ячейки, предупреждая тем самым отказы или сбои в работе ВАКБ, планировать выполнение текущего ремонта, корректировать нормативы технического обслуживания, а также прогнозировать состояние ВАКБ для приближения ее к идеальному ресурсу. Кроме того, эти данные будут полезны для корректирования режимов работы на маршруте и выбора маршрутов по фактическому состоянию для отработки максимально-возможного количества циклов заряд-разряд. Созданы алгоритмы чтения данных, формирования комплекса диагностических параметров и пакета данных для интегрирования во внутреннюю шину данных и отправки на сервер.*

**Ключевые слова:** *высоковольтная аккумуляторная батарея, ячейка, параметры, напряжение, дистанционная диагностика.*

**Введение.** Электрические автотранспортные средства (ЭАТС) стремительно входят в нашу жизнь как в виде легковых электромобилей личного пользования, так и электробусов, троллейбусов с автономным ходом общего пользования. Они показывают замечательные эксплуатационные свойства и имеют относительно высокую надежность.

Первые электромобили начали появляться в разных местах мира начиная с 1830 г. в различных исполнениях, в серию поступили с 1860 г. (например, «Electrobat»). У истоков производства первых электромобилей стояли такие конструкторы, как Густав Труве, Роберт Андерсон, Педро Салом и Генри Г. Моррис, Роберт Скотсман Девидсон<sup>1,2</sup>.

С тех пор и по сегодня самым уязвимым компонентом является высоковольтная аккумуляторная батарея – основной сдерживающий фактор при производстве ЭАТС. Совершенствование аккумуляторов – главная задача всех производителей ЭАТС. У эксплуатирующих организаций другая, не менее важная, задача – получить максимально возможный ресурс ВАКБ. Эта задача может быть выполнена при дистанционном непрерывном контроле отдельных аккумуляторных ячеек по группе диагностических параметров. В настоящей работе рассматриваются способ и устройство для дистанционной диагностики ячеек ВАКБ.

**Основная часть.** Проведем исследование аккумуляторных батарей и ячеек компании «Информбизнес», устанавливаемых на ЭТС и отечественных, и зарубежных автомобильных производителей. Отличительной особенностью системы этого производителя является активная балансировка последовательно соединенных ячеек. Система балансировки выполнена в соответствии с патентом на изобретение «Устройство выравнивания напряжения на батарее»<sup>3</sup>. Данная схема включает систему из двунаправленных преобразователей энергии обратного типа, способную передавать энергию от всей ВАКБ к наименее заряженной ячейке и энергию от наиболее заряженной ячейки всей батарее. Также устройство позволяет измерять напряжение и температуру каждого отдельного элемента литий-ионной аккумуляторной батареи (АБ). Использование активной балансировки значительно усложняет и удорожает всю ВАКБ. Кроме того, производитель сделал систему автономной. В штатном режиме напряжение и температура ячеек не контролируются даже водителем.

Сбором ошибок, возникающих в системе, занимается блок контроля состояния по напряжению и температуре, которому отчитываются последовательно все модули балансировки ячеек. При этом если один из модулей прекращает передачу, то другие модули тоже прекращают передачу. Отказ любого модуля из ячеек, входящих в батарею, приводит к отказу ВАКБ в целом. В случае исправности модуля, но при выходе за допустимые пределы работы ячеек по напряжению или по температуре, отключается автономный режим

<sup>1</sup> URL: <https://quto.ru/journal/istoriya/realnaya-istoriya-elektromobileirealnaya-istoriya-elektromobilei.htm>

<sup>2</sup> URL: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4006660/Forget-Tesla-Incredible-images-reveal-quirky-electric-cars-old-paved-way-Elon-Musk.html#ixzz4miwyaUZ4%>

<sup>3</sup> Stackable Bi-directional Multicell Battery Balancer: №US8692516B2, МПК: H02J7/00. – Опубл. 08.04.2014.

работы ЭАТС либо ЭАТС переводится в аварийный режим работы, что при любом исходе недопустимо при работе на линии.

Для проверки ячеек по напряжению следует подключить специальный сканер-отладчик. С помощью него по каналу BLUETOOTH производится соединение с блоком контроля состояния напряжения и температуры и выводится на экран компьютера в соответствии с рисунком 1.

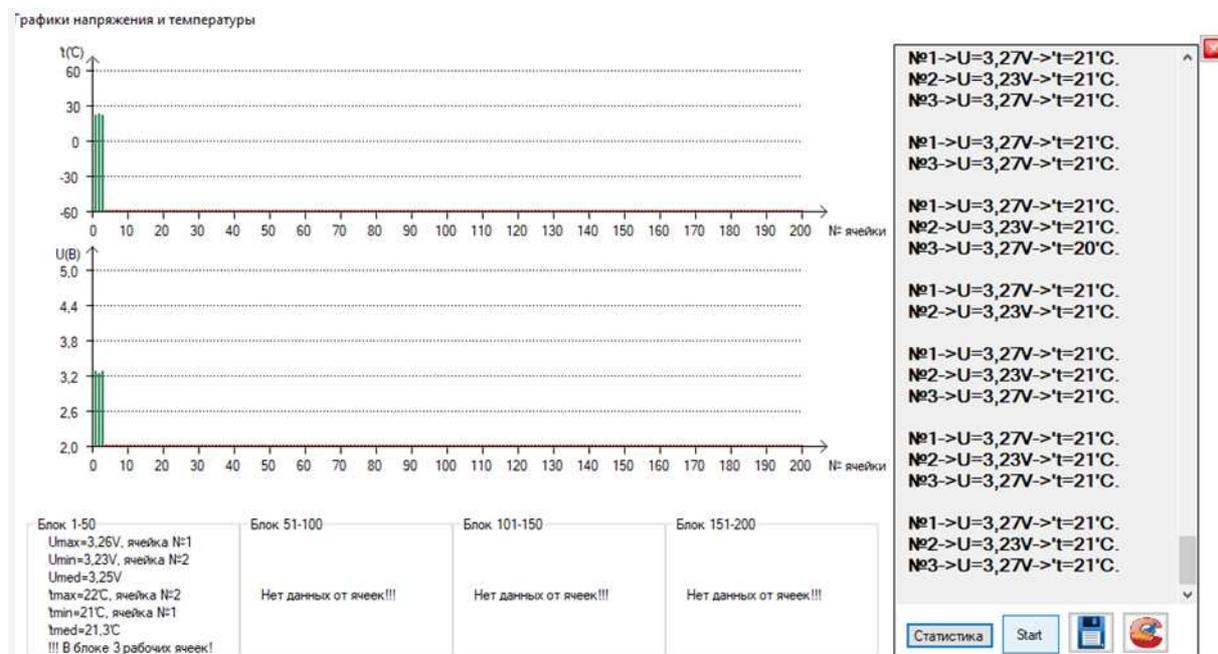


Рисунок 1. – Отображение экрана сканирующего тестера-отладчика

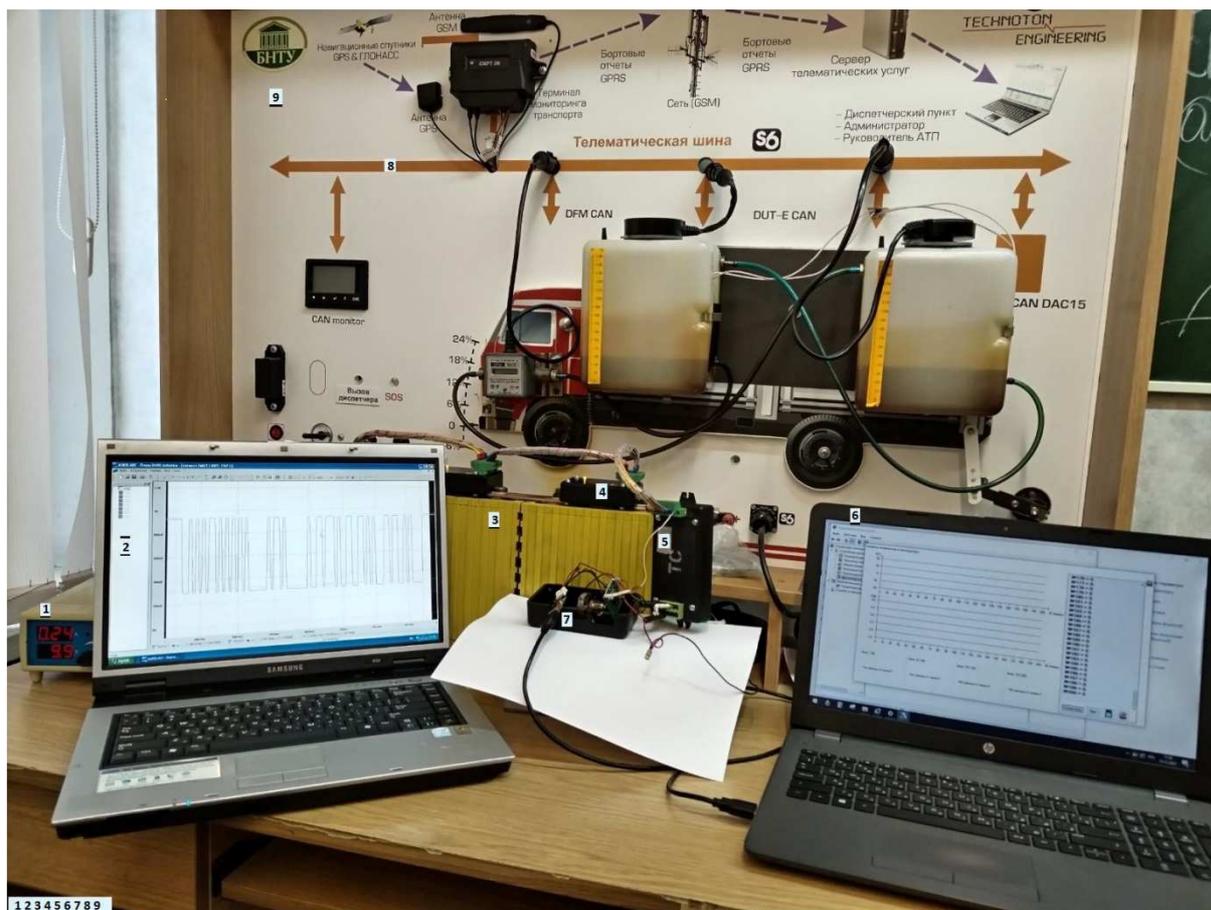
К недостаткам данного диагностического оборудования следует отнести погрешности получаемых данных при работе с BLUETOOTH и программным обеспечением. Как видно на рисунке 1, значения напряжения и температуры имеют расхождения. При проверке наибольшего напряжения значение в блоке 1-50 на 0,01 В меньше значения, одновременно считываемого в правой колонке статистики. Среднее значение напряжения также не соответствует измеренному значению. То же можно сказать и о показаниях температуры. И если такие отклонения по температуре не критичны, то значения в 0,01 В могут иметь серьезные последствия. Другим недостатком является то, что диагностические работы должны проводиться только после возвращения с линии, а это иногда требует транспортировки ЭАТС с помощью аварийной эвакуации. Зачастую диагностическая процедура имеет длительное время для установления проблемной ячейки.

Для устранения названных недостатков предлагается внедрить систему дистанционной диагностики ячеек и ВАКБ в целом путем интегрирования преобразованных данных во внутреннюю сеть данных и передачи на сервер телематических услуг с последующей обработкой данных. В первую очередь это позволит оперативно выявлять проблемные ячейки, предупреждая тем отказы или сбои ВАКБ, планировать выполнение текущего ремонта, корректировать нормативы технического обслуживания (ТО), а также прогнозировать состояние ВАКБ для приближения к идеальному ресурсу. Эти данные могут быть использованы для корректирования режимов работы на маршруте и выбору маршрутов по фактическому состоянию для отработки максимально-возможного количества циклов заряд-разряд.

Для проведения исследований отдельные ячейки 3 с соответствующими модулями балансировки 4 и блоком контроля состояния по напряжению и температуре 5 были установлены на стенд 9, представленный на рисунке 2. Воссозданы условия работы при заряде, разряде и диагностике. Для диагностики был использован специальный сканер-отладчик.

Перед выполнением работы по созданию системы дистанционной диагностики ячеек и ВАКБ в целом путем интегрирования преобразованных данных во внутреннюю сеть данных и передачи на сервер телематических услуг с последующей обработкой данных были проанализированные системы контроля аккумуляторных батарей, предложены других предприятий по диагностике ячеек, проверены варианты с использованием специального прибора для интегрирования в общую шину данных. Однако сдерживающим фактором оказалось применение BLUETOOTH. Для повышения точности передаваемой информации было решено использовать проводную систему передачи информации.

При поиске информации по системе передачи информации было найдено ее минимальное количество, непонятны протокол и стандарт передачи данных.



1 – блок питания стенда; 2 – осциллограф с функцией записи; 3 – ячейка-аккумулятор; 4 – модуль активной балансировки с функцией измерения напряжения и температуры; 5 – блок контроля напряжения и температуры всех ячеек ВАКБ с встроенным передатчиком BLUETOOTH; 6 – специальный сканер-отладчик, 7 – тестовое устройство; 8 – телематическая шина S6 (CAN); 9 – стенд передачи телематических параметров

Рисунок 2. – Стенд для проведения испытаний

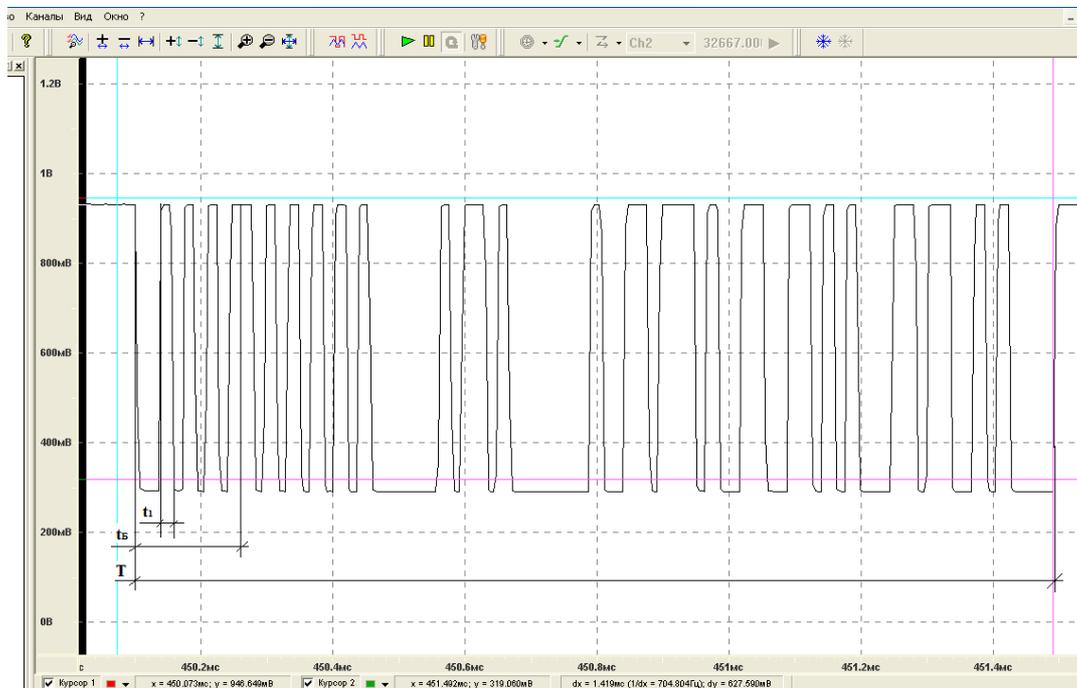
Учитывая, что в настройках специального сканера-отладчика фигурировало обращение к COM порта, было предложено использовать рекомендованный стандарт RS-232 (англ. Recommended Standard 232, другое название EIA232). Данный стандарт используется для асинхронного интерфейса (UART) и на физическом уровне может соответствовать RS-422 или RS-485. Распространенный протокол ISO 9141 данного стандарта подразумевает наличие одного ведущего и одного ведомого устройств для обеспечения связи между ними. Протокол KWP 2000 стандартизован Международной организацией по стандартизации как ISO 14230. Первый основной физический уровень для KWP2000 идентичен ISO 9141 с двунаправленной последовательной линией связи на одном проводе и называется *K*-линией. Кроме того, может быть дополнительная *L*-линия для пробуждения. Скорость передачи данных от 1,2 до 10,4 Кбит/с, при этом сообщение может содержать до 255 байт данных. Подобный принцип был обнаружен позже у модулей балансировки ячеек: у них имеется пробуждающий сигнальный провод, что требует синхронизации задержек сигнала шины. ISO 14230 и ISO 9141 схожи по аппаратной реализации линий передачи данных, т.к. первый – продолжение второго<sup>4</sup>. Различаются они требованиями к электрическим параметрам линии, а также протоколами верхних уровней.

В заблуждение вводит тот факт, что передача идет по одному проводу и сразу ко всем модулям балансировки параллельно. Можно предположить, что это протокол ISO 17987, соответствующий стандарту промышленной сети, ориентированный на управление автомобильными системами низкой ответственности, что сопоставимо с шиной LIN (англ. Local Interconnect Network). По топологии сети тип «общая шина» подобен нашей сети, в которой есть только один ведущий и несколько ведомых блоков. Однако шина LIN поддерживает до 15 модулей, а в рассматриваемой ВАКБ их используется 200, что опровергает предположение.

Требуется более глубокий анализ данной системы передачи данных.

<sup>4</sup> URL: <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel09E043.pdf>

1 этап. Анализ электрических параметров передаваемого сигнала<sup>5</sup>. Для данной работы необходим осциллограф с возможностью записи осциллограмм. Аккумуляторные ячейки с модулями балансировки подключаются на стенде, активируется блок контроля напряжения и температуры, подключается осциллограф к сигнальному проводу. Записывается сигнал и разворачивается до удобочитаемых размеров осциллограмм в соответствии с рисунком 3.



**t1 – длительность одиночного бита; tB – длительность одного байта;  
T – длительность полного сообщения**

**Рисунок 3. – Развернутая осциллограмма полученного сигнала**

Рекомендуется развертку установить на наибольшее значение, т.к. частота передаваемого сигнала на этапе испытаний неизвестна. В данном случае была включена развертка при записи сигнала в 250 тыс. выборок в секунду. Наличие наклонных линий отдельных импульсов с одной стороны указывает на необходимость увеличения частоты развертки, с другой – на высокую частоту передаваемого сигнала. При расчете амплитудных значений следует учесть, что на входе осциллографа установлен делитель входного сигнала 1:10.

Полученные результаты обработки полученного сигнала заносятся в таблицу.

**Таблица. – Результаты обработки полученного сигнала**

Параметры с единицами измерения	Значение	Обозначение
Верхнее значение амплитуды, В	9,4	AB
Нижнее значение амплитуды, В	3,5	AH
Размах сигнала, В	5,9	A
Период следования пачки импульсов, с	4,0	ТП
Длительность следования пачки импульсов, мс	1,4	T
Длительность следования 1 бита, мкс	17,40	t1
Длительность следования 1 байта, мкс	156,3	tB
Абсолютная погрешность длительности 1 бита, мкс	0,03	Δt1
Количество битов, шт.	9	nб
Количество стартовых битов, шт.	1	nST
Количество информационных битов, шт.	8	nI
Количество стоповых битов, шт.	0	nSP

<sup>5</sup> Гурский А.С., Седяко П.В. Анализ шины K-line как первоисточника параметров для общего и поэлементного диагностирования = Analysis of the K-line bus as the primary source of parameters for general and element-by-element diagnostics // XI Форум вузов инженер.-технол. профиля Союз. государства: сб. материалов / Минск (12–16 дек. 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2023. – С. 133–136.

Определяем скорость передачи данных:

$$BD = \frac{10^6}{t_1}, \text{ кбит/с}, \quad (1)$$

где  $t_1$  – одиночный бит;  
 $10^6$  – переводной коэффициент;

$$BD = \frac{10^6}{17,4} = 57\,471 \text{ Кбит/с}.$$

Принимаем скорость  $BD = 57\,600$  Кбит/с.

Определяем количество битов:

$$n_B = \frac{t_B}{t_1}, \quad (2)$$

где  $t_B$  – длительность байта;  
 $n_B$  – количество битов в байте.

$$n_B = \frac{156,3}{17,4} = 8,983.$$

Принимаем количество байтов  $n_B = 9$ .

Определяем среднюю длительность одиночного бита:

$$t_{cp} = \frac{t_B}{n_B}, \text{ мкс.} \quad (3)$$

Определяем среднюю длительность бита:

$$t_{cp} = \frac{156,3}{9} = 17,37 \text{ мкс.}$$

Определяем абсолютную погрешность измерения длительности одиночного бита:

$$\Delta t_1 = |t_{cp} - t_1|, \text{ мкс.} \quad (4)$$

$$\Delta t_1 = |17,37 - 17,40| = 0,03 \text{ мкс.}$$

*Этап 2. Расшифровка полученных данных* [1]. Перед началом расшифровки полученных данных можно сделать несколько предположений, основанных на анализе документа KWP 2000 (Keyword Protocol 2000), а также проведенных испытаний:

- порядок следования параметров в программе специального сканера-отладчика и порядок следования байт сообщения на осциллограмме одинаковы;
- если переменная находится в достаточно большом диапазоне значений (более 255) или имеет высокую точность (в имеющемся диапазоне с данной точностью имеет более 255 значений переменной), то для хранения значения такой переменной используется 2 байта;
- если переменная дробная, то используется коэффициент для разбивки диапазона переменной на 255 значений с необходимой точностью;
- если значение переменной выходит за пределы от 0 до 255, то используется смещение (прибавляется или отнимается некая постоянная величина).

На основании вышеизложенных предположений значение параметра, которому для хранения нужен только 1 байт, сводится к предполагаемой формуле линейного закона:

$$N = E_{DEC} \cdot a + b, \quad (5)$$

где  $E_{DEC}$  – передаваемый байт, содержащий значение параметра преобразованный из шестнадцатеричной в двоичную систему исчисления;

$a$  – коэффициент, учитывающий крутизну значения параметра;

$b$  – корректировка начальной точки относительно оси абсцисс (смещение диапазона параметра).

После проведения испытаний было предложено для повышения точности пересылаемых данных до 0,01 В ввести дополнительный корректирующий коэффициент  $k$ . Кроме того, установлено, что коэффициент, учитывающий крутизну значения параметра,  $a = 1$ . Тогда формула по определению напряжения будет выглядеть следующим образом:

$$N = k(E_{DEC} + b). \quad (6)$$

Для нахождения коэффициентов в линейном законе необходимо иметь две точки в системе координат, из формулы (1) видно, что имеется два неизвестных значения коэффициентов. Для их нахождения необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} N_1 = k(E_{1DEC} + b), \\ N_2 = k(E_{2DEC} + b), \end{cases} \quad (7)$$

где  $N_1, N_2$  – значение интересующего параметра по показаниям специального сканера-отладчика;  
 $E_{1DEC}, E_{2DEC}$  – передаваемый байт, преобразованный из шестнадцатеричной в десятичную систему исчисления;

$k$  – дополнительный корректирующий коэффициент;

$b$  – смещение диапазона параметра.

После несложных преобразований коэффициенты  $k$  и  $b$  будут равны

$$k = \frac{N_2 - N_1}{E_{2DEC} - E_{1DEC}}. \quad (8)$$

При подстановке значений в формулу получаем  $k = 0,01$ , что подтверждает предположение о точности данных напряжения в 0,01 В.

$$b = N_1 - E_{1DEC} \cdot k = N_1 - E_{1DEC} \cdot \frac{N_2 - N_1}{E_{2DEC} - E_{1DEC}}. \quad (9)$$

При подстановке значений в формулу получаем  $b = 209$ .

Подобным образом вычисляется корректирующий коэффициент в формуле определения температуры ячеек.

*Этап 3. Изготовление устройства согласования уровней и преобразователя интерфейсов транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) COM–USB.* Простейшим решением для считывания данных следует применить преобразователь COM–USB для работы с рекомендованным стандартом RS-232. Для захвата и согласования уровней сигналов применен операционный усилитель, который имеет возможность подстройки по уровню сигнала. Пример электрической принципиальной схемы согласования уровней сигнала и преобразователя представлен на рисунке 4.

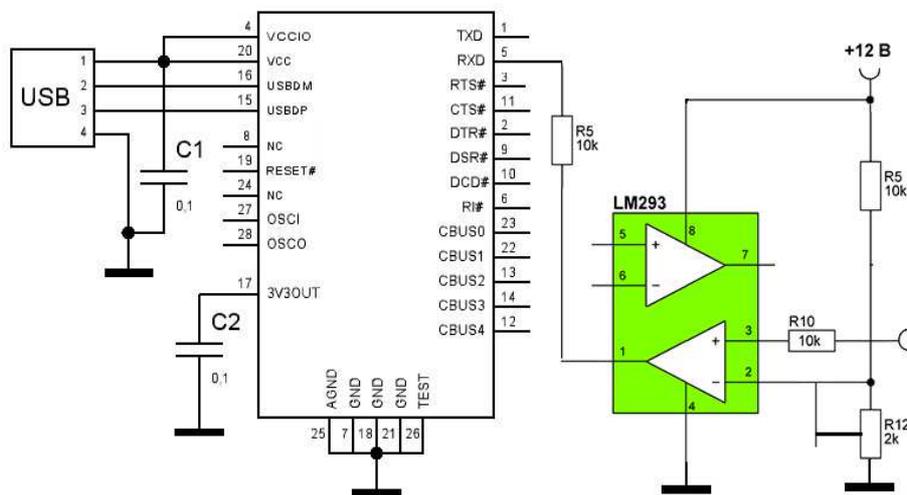


Рисунок 4. – Электрическая принципиальная схема согласования уровней сигнала и преобразователя

*Этап 4. Создание алгоритма чтения данных [2].* Разработанный алгоритм приведен на рисунке 5.

На базе представленного алгоритма создается рабочее окно на экране с выделением кнопок включения, выключения и области вывода данных в столбец с отсчетом времени и синхронным переводом в различных системах исчисления для удобства дальнейшей работы. После получения пакета данных процедура многократно повторяется для выявления возможных сбоев в работе и точной повторяемости результатов. При наличии сбоев необходимо проверить и отрегулировать уровни захвата сигнала операционным усилителем. После подтверждения точности и достоверности передаваемых данных необходимо проверить первый полученный байт с осциллографическим сигналом в соответствии с рисунком 4.

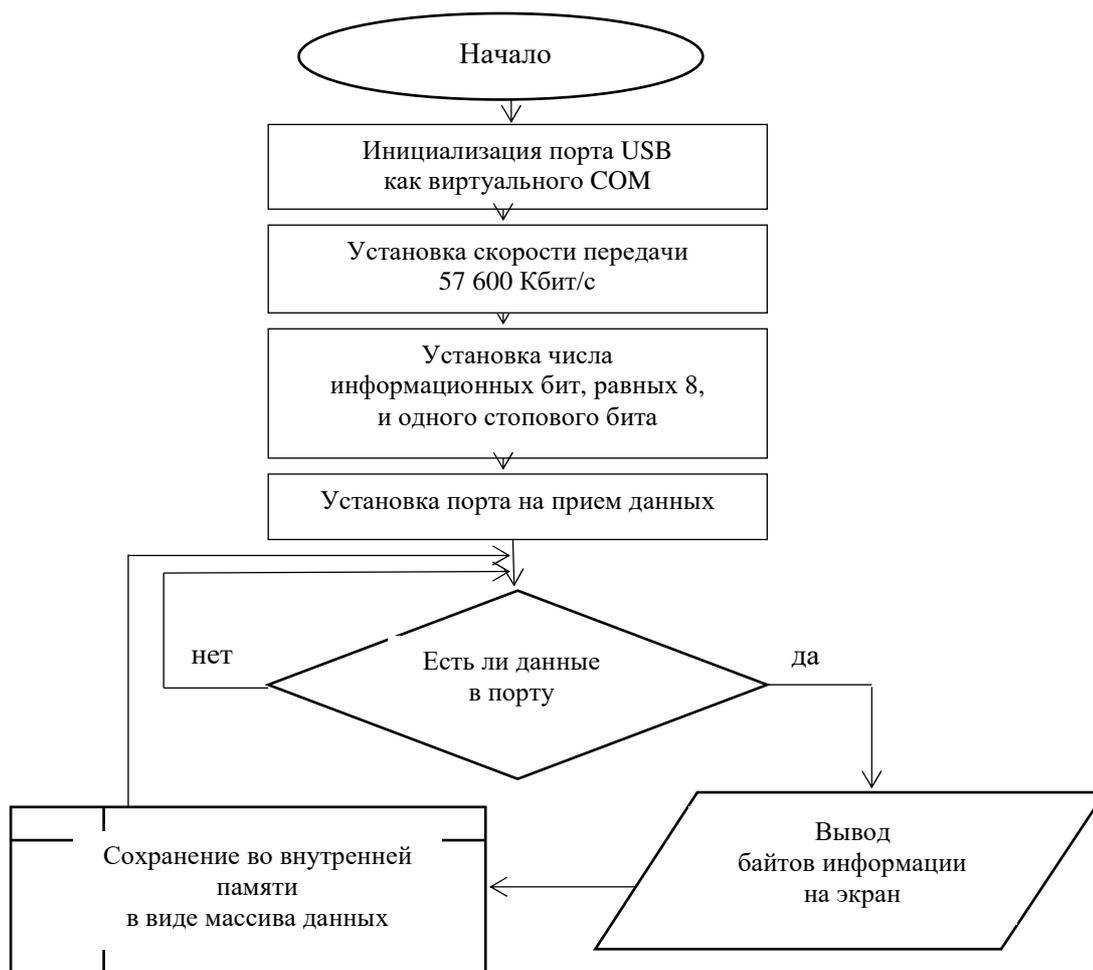


Рисунок 5. – Алгоритм чтения данных

*Этап 5. Расшифровка и верификация пакета данных.* Следует учитывать тот факт, что передача байтов осуществляется по направлению от младшего разряда к старшему, поэтому расположим биты первого байт следующим образом: 10101010. Эта запись сделана в двоичной системе исчисления, что соответствует числу AA в шестнадцатеричной системе исчисления и числу 170 в десятичной.

В случае получения стабильных сообщений с начальным байтом, равным 170, пытаемся по данному байту инициализировать протокол передачи данных. Однако после анализа известных протоколов передачи сообщений выявлено, что данное значение байта в них не применяется. Следовательно, необходимо использовать метод реверс-инжиниринга.

После проведения исследований было установлено, что первые три байта отвечают только за идентификацию и не несут полезной технической информации. Следующий байт указывает на порядковый номер ячейки. Следующие байты постоянно изменяются, что свидетельствует об их информационной составляющей. Можно допустить, что четвертый байт отвечает за уровень напряжения ячейки, а пятый – за температуру. Последний байт предположительно отвечает за окончание передачи пакета данных.

Дешифрование полученных последовательностей производится с использованием формул (5)–(9).

Вначале определяются данные по напряжению и проводится верификация полученных значений. Для проведения испытаний создаются условия изменения напряжения на ячейке. Сложность заключается в том, что модуль активной балансировки и контроля постоянно подключен параллельно ячейке и сопротивление блока постоянно меняется в зависимости от уровня напряжения на ней. Лучшим способом в данном случае является подключение к внешнему источнику стабилизированного напряжения с плавной регулировкой напряжения. Устанавливаем нормативное значение напряжения, в данном случае соответствующее полной зарядке ячейки 3,3 В. Сопротивление модуля в этом случае составляет 200 Ом, сила тока в цепи равна 0,0165 А. Плавное изменение уровня напряжения с шагом 0,001 В и отслеживание значения по вольтметру, определяем полученное значение байта напряжения. Установлено, что значение байта напряжения изменяется при выполнении 10 шагов изменения напряжения на ячейке. Проведенное испытание подтверждает, что считываемый байт напряжения в цифровом виде соответствует точности 0,01 В.

Подобный подход используется и для определения температуры.

На первом этапе формируем комплекс параметров для определения состояния ячеек аккумуляторной батареи. Рабочее напряжение ячеек принимается за исходное значение

*Этап 6. Формирование комплекса диагностических параметров для интегрирования во внутреннюю шину данных и отправки на сервер.* Определяем среднее значение напряжения по формуле

$$U_{cp} = \frac{\sum_1^n U}{n}, \text{ В.} \quad (10)$$

Алгоритм определения ячеек с наибольшими и наименьшими значениями по напряжению представлен на рисунке 6.

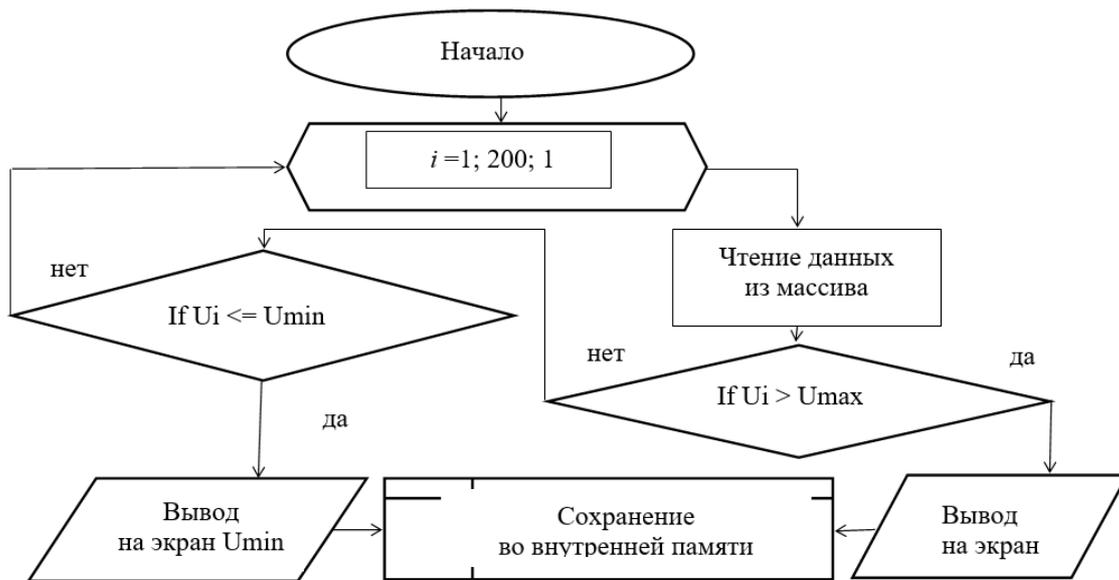


Рисунок 6. – Алгоритм определения ячеек с наибольшими и наименьшими значениями по напряжению

Определяем разность значений напряжения по ячейкам по формуле:

$$\Delta U = U_{max} - U_{min}, \text{ В.} \quad (11)$$

В случае превышения разности значений напряжения по ячейкам над критическими значениями включается сигнализатор аварии с указанием номера соответствующей ячейки.

По образцу напряжения определяется средняя и наибольшая температура ячеек. При выявлении наибольшей температуры в ячейке записывается номер ячейки. В случае превышения температуры в ячейке над критическим значением включается сигнализатор аварии с указанием номера соответствующей ячейки.

Измерения параметров всех ячеек производятся каждые 4 с с соответствующими расчетами в течение 1 мин. Таким образом, после считывания 15 раз 200 сообщений от каждого из модулей балансировки выполняется окончательное формирование пакета сообщения для хранения и отправки на сервер. При получении последовательно средних значений напряжения определяем режим работы батареи в целом: заряд, разряд, покой. После сравнения первого значения средних напряжений с последним определяется режим работы батареи:

- если первое значение больше последнего – происходит разряд;
- если первое значение меньше последнего – происходит заряд;
- если первое значение равно последнему – состояние покоя.

Обрабатывается массив, накопленный в течение 1 мин и содержащий 9000 информационных байтов за 15 циклов. В каждом из циклов в соответствии алгоритмом (см. рисунок 6) производится расчет 200 значений напряжения, 200 значений температуры и 200 номеров ячеек. После обработки для постоянного хранения и отправки на сервер остается только комплекс параметров, включающий:

- среднее напряжение;
- наибольшее напряжение и номер ячейки;
- наименьшее напряжение и номер ячейки;
- наибольшую температуру и номер ячейки;
- режим работы и аварийное состояние.

*Этап 7. Формирование пакета данных для интеграции в шину данных CAN отправки на сервер.* Для организации стандартного пакета данных создаем строку в соответствии с международным стандартом ISO 11898 [3]. Идентификационный номер ячеек выбираем из перечня зарезервированных дополнительных идентификаторов с установкой среднего приоритета сообщений. Выбираем максимальное количество 8 байт сообщения. Первый байт формируется из среднего значения напряжения. Для формирования первого байта используем ту же формулу для шифрования данных, что и в исходной системе. Удобство заключается том, что можно передать значение напряжения в виде 1 байта высокой точностью с шагом 0,01 В. Значение напряжения после расчета переводим в шестнадцатеричную систему исчисления. Вторым, четвертым и шестым байты будут задействованы для отображения номеров ячеек в шестнадцатеричной системе исчисления. Третий и пятый будут показывать значения наибольшего и наименьшего напряжения по аналогии с первым байтом. Седьмой байт – значения температуры. Для удобства измерения отрицательных температур используем корректирующие постоянные по тому же принципу, что и в исходном сообщении. Восьмой байт следует разделить на два полубайта. Старший будет отражать режим работы: заряду будет соответствовать значение 1, разряду – значение 2, состоянию покоя – 0. Младший полубайт будет отражать ошибки работы ячеек: 0 – ошибок нет; 1(A) – превышение высшего значения напряжения; 2(B) – превышение нижнего предела; 3(C) – превышение температуры ячейки; 4(D) – превышение разности напряжений.

При этом вышеуказанные ошибки указывают на превышение в небольшом диапазоне, что соответствует желтому цвету предупреждения. Эти же ошибки с уровнем значения А, В, С, D укажут на аварийное состояние требующего оперативного вмешательства соответствует красному цвету с включением звукового сигнализатора или речевого информатора.

**Заключение.** Данные, полученные с ячеек ВАКБ, имеют высокую информационную ценность для общего и поэтапного диагностирования. Накопление данных за интервалы времени или пробега позволяют корректировать нормативы ТО и ТР, режимы работы для получения ресурса ВАКБ, приближенного к максимально возможному. Обработка данных о состоянии ячеек ВАКБ даст возможность проводить прогнозирование работоспособности, выполнения ремонтно-восстановительных работ, а также определять экономическую эффективность эксплуатации при ухудшении технических качеств ячеек.

Выполненная работа состоит из 7 этапов: анализа электрических параметров передаваемого сигнала; расшифровки полученных данных; изготовления устройства согласования уровней и преобразователя интерфейсов транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) COM–USB; создания алгоритма чтения данных; расшифровки и верификации пакета данных; формирования комплекса диагностических параметров для интегрирования во внутреннюю шину данных и отправки на сервер; формирования пакета данных для интеграции в шину данных CAN отправки на сервер.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сделать выводы:

1. Внедрение дистанционной диагностики позволит с высокой точностью определять состояние отдельных ячеек и ВАКБ в целом.
2. Существующие штатные модули активной балансировки и блок контроля за напряжением и температурой отлично работают в автономном режиме, однако функции диагностики имеют ограничения.
3. Сравнение суммы напряжений всех ячеек с общим напряжением ВАКБ позволит диагностировать систему контроля по достоверности и точности измерения.
4. Введение более совершенной системы диагностики позволит сократить сбои и отказы ВАКБ, скорректировать нормативы ТО и ТР, выполнять прогнозирование работоспособности, корректировать маршруты и загрузку ЭАТС, что позволит получить наибольший возможный ресурс ВАКБ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский А.С., Седяко П.В. Реверс-инжиниринг протоколов обмена шин данных электронных блоков управления = Reverse engineering of exchange protocols data bus of electronic control units // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 36–44.
2. Гурский, А. С. Анализ параметров высоковольтных аккумуляторных батарей электробусов с целью создания алгоритмов их общего и поэтапного диагностирования с применением телематических систем = Analysis of parameters of high-voltage batteries of electric buses in order to create algorithms for their general and element-by-element diagnostics using telematics systems / А. С. Гурский // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. / редкол.: С. В. Харитончик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 12-20.
3. Гурский А.С, Савич В.Л. Мониторинг транспортных средств с использованием шины данных CAN. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 24–36.

#### REFERENCES

1. Gurskii, A.S. & Sedyako, P.V. (2022). Revers-inzhiniring protokolov obmena shin dannykh elektronnykh blokov upravleniya [Reverse engineering of exchange protocols data bus of electronic control units]. *Transport i transportnye sistemy:*

- konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies], (4), 36–44. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Gurskii, A.S. (2022). Analiz parametrov vysokovol'tnykh akkumulyatornykh batarei elektrobusov s tsel'yu sozdaniya algoritmov ikh obshchego i poelementnogo diagnostirovaniya s primeneniem telematicheskikh sistem [Analysis of parameters of high-voltage batteries of electric buses in order to create algorithms for their general and element-by-element diagnostics using telematics systems]. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies], (4), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.)
  3. Gurskii, A.S. & Savich, E.L. (2017). *Monitoring transportnykh sredstv s ispol'zovaniem shiny dannykh SAN*. Minsk: BNTU. (In Russ.)

Поступила 28.12.2023

## IMPROVEMENT OF REMOTE DIAGNOSTICS OF CELLS OF A HIGH-VOLTAGE BATTERY PACK

A. GURSKII

(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The article discusses the method and device for remote diagnostics (RD) of cells of a high-voltage battery pack (HVBP) of electric vehicles (EV). The data obtained can be used in the diagnosis of electric vehicles, as well as in the design, maintenance and repair. Improvement of remote diagnostics of individual cells and the entire HVBP by integrating the converted data into the internal data network and transmitting to the server of telematics services with subsequent data processing, which, first of all, will allow to quickly identify problem cells, thereby preventing failures or failures in the operation of the HVBP, plan routine repairs, adjust maintenance standards, and also to predict the state of the HVBP in order to bring it closer to the ideal resource. This data can be used to adjust the operating modes on the route and to select routes according to the actual state in order to work out the maximum possible number of charge-discharge cycles.*

*The work includes the creation of algorithms for reading data, the formation of a set of diagnostic parameters and a data package for integration into the internal data bus and for sending to the server.*

**Keywords:** high-voltage battery, cell, parameters, voltage, remote diagnostics.

УДК 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-89-94

## ИНФОРМАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ В КОНТЕКСТЕ ГОРОДСКИХ ПЕРЕВОЗОК

**Е.В. ШВЕЦОВА**

*(Брестский государственный технический университет)*

*Дан краткий обзор внедренных на постсоветском пространстве информационно-транспортных систем. Представлена концепция информационно-транспортной системы городских пассажирских перевозок на базе беспилотных электрокаров, реализующая новую технологию организации перевозочного процесса на основе использования интеллектуальных алгоритмов управления, транспорта с разделяющимися частями и скоростной перевозки. Предложенные методы организации перевозки направлены на обеспечение наиболее качественного и своевременного обслуживания пассажиров системы при максимально эффективном использовании подвижного состава.*

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационная транспортная система, планирование перевозок, организация перевозок, прогнозирование пассажиропотока, план перевозок, матрица корреспонденций, роботизированное транспортное средство, инфобус.

**Введение.** Неуклонный рост плотности населения в мегаполисах и городских агломерациях обуславливает необходимость трансформации большинства городских инфраструктур, сталкивающихся с возрастающим потоком требований и запросов, на которые необходимо дать оперативную и адекватную реакцию. Глубокое вовлечение информационных и телекоммуникационных технологий в протекающие социальные процессы обеспечивает как возможность сбора данных, так и их анализ для принятия стратегических и оперативных решений. В транспортной сфере на смену классическим технологиям грузовых и пассажирских перевозок приходят новые технологии, создающие новый вид транспортных систем, объединяющие транспортные, информационные и телекоммуникационные потоки в единый бизнес-процесс.

Согласно определению<sup>1</sup> информационно-транспортная система (ИТС) – это «система, интегрирующая современные информационные, коммуникационные и телематические технологии, технологии управления и предназначенная для автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления транспортно-дорожным комплексом региона, конкретным транспортным средством или группой транспортных средств с целью обеспечения заданной мобильности населения, максимизации показателей использования дорожной сети, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфорта для водителей и пользователей транспорта».

Поставленные перед ИТС цели могут быть реализованы только при возможности оперативного получения актуальных сведений о дорожно-транспортной обстановке, а также аналитики, сформированной на основе собранных ретроспективных данных.

На постсоветском пространстве в сфере городских пассажирских перевозок внедренные ИТС представлены на данный момент через отдельные виды сервисов:

– *умную пассажирскую инфраструктуру.* Во многих городах появились умные остановки. Так, в 2023 г. в Санкт-Петербурге была установлена первая умная остановка общественного транспорта, оснащенная системами видеонаблюдения и информирования о возникающих чрезвычайных ситуациях, а также помощи людям с ограниченной мобильностью;

– *систему подсчета пассажиров,* позволяющие осуществлять учет числа входящих и выходящих пассажиров из транспортного средства, что дает возможность сбора точных данных о пассажирообмене на остановках;

– *мобильные приложения* для определения маршрута поездки, вызова такси, отслеживания заторов на дорогах;

– *электронные карты* для оплаты проезда.

Все перечисленные системы представляют собой пока еще разрозненные сервисы, несомненно, локально упрощающие общественные городские пассажирские перевозки, но при этом не решающие основные проблемы данной сферы: ошибки диспетчеризации, обусловленные прежде всего использованием при принятии решений неактуальных и неточных данных, и парк транспортных средств фиксированной пассажироместимости, который зачастую не соответствует изменениям спроса на перевозку, что в итоге приводит к курсированию на маршрутах полупустых или перегруженных транспортных средств.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56294-2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физическим архитектурам интеллектуальных транспортных систем. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.

В данной работе предлагается концептуальная модель пассажирских перевозок в городской пассажирской информационно-транспортной системе, основанной на беспилотных электрокарах, способной эффективно устранить вышеназванные проблемы.

**Основная часть. Элементы городской пассажирской ИТС на базе беспилотных электрокаров.** Подробно модель городской пассажирской ИТС на базе беспилотных транспортных средств и организации перевозок в ней была описана в работах [1–4]. Она состоит из следующих элементов:

– *парк беспилотных электрокаров* – парк транспортных средств малой вместимости (до 30 чел.), называемых инфобусами. Каждый инфобус находится под управлением собственной бортовой системы, которая постоянно коммуницирует с единой управляющей системой ИТС, получая от нее управляющее воздействие и отправляя отчеты о выполнении полученных команд [1]. Инфобусы осуществляют движение по выделенной линии (рельсы или выделенная полоса) последовательно, без обгонов. Каждый инфобус может двигаться как автономно, так и синхронно с другими инфобусами, образуя при этом кассету – модульное транспортное средство новой вместимости (благодаря кассетам можно сформировать транспортное средство любой вместимости в режиме реального времени) (рисунок 1, а).

Возможность быстро по необходимости формирования кассет – отличительная черта транспортной технологии в рассматриваемой ИТС. Другой отличительной чертой является требование к движению инфобусов: оно обязательно должно осуществляться по выделенной линии, где инфобусы не будут испытывать при движении помех со стороны других видов транспортных средств. Перекрестки преодолеваются по эстакадам (рисунок 1, б) или подземным туннелям (рисунок 1, в). Данные требования позволяют инфобусам при движении развивать более высокую скорость по сравнению с другими видами наземного общественного транспорта;

– *пассажирские остановки*, оснащенные терминалами для сбора заявок на перевозку (рисунок 1, г). Зарегистрированные через терминалы заявки от пассажиров через средства телекоммуникаций передаются единой управляющей системе ИТС и фиксируются в ней;



а



б



в



г

а – инфобус и кассета инфобусов; б – преодоление перекрестков по эстакадам;  
в – преодоление перекрестков по подземным туннелям;  
г – остановки и терминалы для регистрации заявки на них

Рисунок 1. – Элементы информационно-транспортной системы

– *регулярный маршрут движения* инфобусов, включающий в себя  $k$  остановок. На обоих концах маршрута находятся накопители, где инфобусы начинают и заканчивают рейс, осуществляют подзарядку и ожидают сигналов от управляющей системы ИТС (рисунок 2).

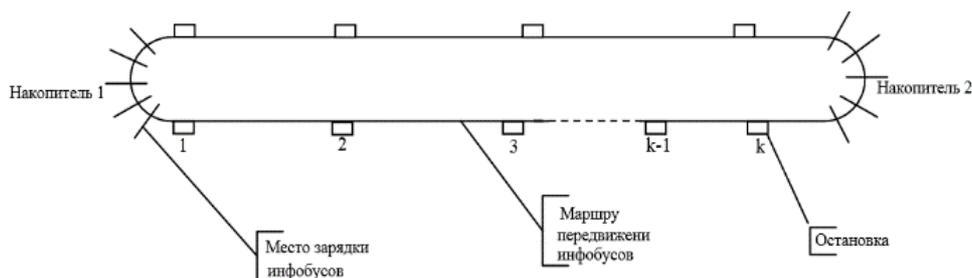


Рисунок 2. – Маршрут движения инфобусов

**Информационная структура ИТС.** Под информационной структурой ИТС понимается совокупность собираемых данных и элементов, участвующих в их сборе, хранении, обработке и организации перевозки. Она включает в себя:

- метрики заявок, поступающих в систему от пассажиров (рисунок 3).

ID integer	Origin integer	Destination integer	SeatsNumber integer	TimeRequest timestamp without time zone
109122	3	7	1	2021-06-16 00:07:57.07
109130	8	10	1	2021-06-16 00:08:11.08
109131	2	7	1	2021-09-02 10:18:09.18
109135	4	7	1	2021-09-02 10:18:18.18
109137	4	10	1	2021-09-02 10:18:23.18
109141	1	5	1	2021-09-02 10:40:51.4
109142	8	9	1	2021-09-02 10:40:55.4

Рисунок 3. – Структура метрик заявки

В собираемые метрики заявок входит идентификатор заявки (поле «ID»), номер остановки отправления (поле «Origin»), номер остановки назначения (поле «Destination»), число мест в заявке (поле «SeatsNumber», по умолчанию значение равно 1), время регистрации заявки (поле «TimeRequest»). Данная совокупность метрик позволяет определять такие важные показатели перевозки, как время ожидания каждым пассажиром транспортного средства, продолжительность поездки пассажира, коэффициент сменности за рейс, средняя длина поездки и т.д.;

– *информационный сервер*, являющийся единой управляющей системой ИТС. Он реализует не только логику работы с данными (сбор, хранение, обработка, анализ), но и логику управления системой (определение алгоритма перевозки, составление планов перевозки). Состоит из таких подсистем, как система сбора заявок (ССЗ), система анализа данных (САД) и система организации перевозок (СОП). На рисунке 4 представлена общая схема потока данных в ИТС.



Рисунок 4. – Общая схема потока данных в информационно-транспортной системе

Поступающие с терминалов остановок в ССЗ заявки на перевозки сохраняются в базе данных, которая через заданный интервал (20–30 с) сканируется информационным сервером на предмет достаточности их накопления. При выполнении условия достаточности накопления заявок информационный сервер формирует на их основе матрицу корреспонденций, являющуюся информационной основой для дальнейшей организации перевозки;

– *матрицу корреспонденций* – это квадратная матрица размерности  $k \times k$ , где  $k$  – число остановок одного направления маршрута (рисунок 5). Каждый элемент  $m_{ij}, i = \overline{1, k-1}, j = \overline{2, k}$  матрицы несет в себе информацию о запросах на перевозку по корреспонденции  $ij$  в текущий момент времени, т.к. определяет количество пассажиров, желающих ехать с остановки  $i, i = \overline{1, k-1}$  на остановку  $j, j = \overline{2, k}$ . Очевидно, что элементы матрицы на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю, т.к. предполагается, что пассажир не может выйти на остановке, на которой сел, и не может ехать назад [2];

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & \dots & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1k} \\ 0 & 0 & m_{23} & \dots & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2k} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & m_{i+1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{ik} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & m_{k-1k} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 5. – Матрица корреспонденций

– *алгоритмы организации перевозки*. Организация пассажирских перевозок в рассматриваемой ИТС всегда осуществляется в соответствии с одним из используемых в ИТС алгоритмов перевозки (будут описаны ниже). Выбор алгоритма осуществляется по принципу оптимальности в данный момент среди всех используемых алгоритмов. Для определения наиболее оптимального алгоритма информационный сервер на основе каждого алгоритма и матрицы корреспонденций рассчитывает план перевозки, включающий в себя определение числа используемых транспортных средств, посещаемых остановок маршрута для каждого инфобуса и графиков движения для каждого транспортного средства [5; 6]. Также для каждого алгоритма оцениваются параметры эффективности. На их основе вычисляется значение целевой функции, минимальное значение которой определяет наиболее оптимальный в данный момент алгоритм перевозки;

– *целевую функцию* – функцию общих потерь перевозки – индикатор эффективности перевозки с использованием исследуемого алгоритма. Состоит из суммы оценок потерь перевозки (коэффициентов), которые предположительно понесут транспортное предприятие и пассажиры:

$$P(K_{НВ}, K_{ОСТ}, K_{ОП}, K_{ПП}) = K_{НВ} + K_{ОСТ} + K_{ОП} + K_{ПП} \rightarrow \min,$$

где  $K_{НВ}$  – коэффициент неиспользованной пассажировместимости транспортного средства (отражает потери от неиспользованной пассажировместимости транспортного средства во время перевозки);  $K_{ОСТ}$  – коэффициент «остановочности» (отражает потери транспортной системы от процесса торможения-разгона во время перевозки);  $K_{ОП}$  – коэффициент времени ожидания пассажиром транспортного средства (отражает временные потери пассажира на ожидание транспортного средства);  $K_{ПП}$  – коэффициент продолжительности поездки (отражает временные потери пассажира во время поездки). Для текущей перевозки выбирается алгоритм, показавший минимальное значение функции потерь.

**Принципы организации перевозки.** В зависимости от количества сделанных в пути остановок транспортным средством перевозка пассажиров может осуществляться в обычном, скоростном или экспрессном режиме [7]. Исследования показали, что пропуск некоторых остановок при движении на маршруте влечет за собой прямые экономические выгоды как для перевозчика, так и для пассажиров, но при этом не гарантирует удовлетворение всех заявок на перевозку [7]. В то же время перевозка с посещением всех остановок маршрута лишена данного недостатка, но влечет существенное увеличение времени поездки пассажиров, а также расходов транспортного предприятия. Комбинирование способов перевозки позволяет удовлетворить все заявки на перевозку и добиться снижения потерь как транспортной организации, так и пассажиров [7]. Пассажирская перевозка в ИТС построена на использовании комбинированного режима, что является третьей особенностью технологии перевозки в ИТС. Задачей управляющего сервера ИТС является рациональное применение алгоритмов организации перевозки.

*Алгоритм перевозки на основе критического элемента матрицы корреспонденций («по критическому элементу»).* Алгоритм перевозки «по критическому элементу» [8] рассчитан на массовый безостановочный

провоз пассажиров (например, более 80% от объема салона транспортного средства) от остановки  $i$  до остановки  $j$  маршрута. Очевидно, что чем длиннее перегон  $ij$ , тем большую скорость может развить транспортное средство на этом участке и тем выше провозная способность и производительность перевозки пассажиров. Также для максимизации экономического эффекта от перевозки на подъезде от накопителя к остановке  $i$  и при отъезде от остановки  $j$  к противоположному накопителю возможен дополнительный подвоз пассажиров.

**Достоинство:** данный вид перевозки является скоростным, т.к. остановки маршрута посещаются выборочно, в соответствии с логикой алгоритма. Пассажиры делают минимальное число ненужных им остановок, а транспортное средство не осуществляет лишние торможения и разгоны. **Недостаток:** обслуживаются не все остановки маршрута.

**Алгоритм перевозки на основе строки матрицы корреспонденций («по строке»).** Алгоритм перевозки «по строке» рассчитан на развоз пассажиров с некоторой остановки маршрута, на которой накопилось достаточно пассажиров (например, более 80% от объема салона транспортного средства). Алгоритм предполагает формирование кассеты инфобусов для развоза всех пассажиров с остановки. Причем каждый инфобус везет своих пассажиров лишь на несколько соседних остановок. Таким образом соблюдается скоростной режим перевозки. Достоинства и недостатки у данного вида перевозки те же, что и у предыдущего алгоритма.

**Алгоритм обычной перевозки «по наиболее пассажиронапряженному перегону».** Транспортная система не может обслуживать только «выгодные» остановки маршрута и игнорировать интересы прочих. В связи с этим в перевозку должны включаться и алгоритмы, гарантирующие удовлетворение заявок пассажиров, не попавших в «скоростные» алгоритмы. Алгоритм «по наиболее пассажиронапряженному перегону» позволяет рассчитать объем транспортного средства (кассеты) для перевозки на основе данных матрицы корреспонденций о числе пассажиров, которые будут ехать в транспортном средстве на наиболее загруженном (пассажиронапряженном) перегоне (участке маршрута между двумя соседними остановками). Таким образом, на маршрут будет выслано транспортное средство минимально необходимой вместимости.

**Функционирование системы.** Пассажир делает через терминал на остановке либо через приложение заявку на перевозку, которая через средства телекоммуникации передается на сервер ИТС. ИС производит постоянное сканирование накопленных заявок и при выполнении условия их достаточного накопления формирует матрицу корреспонденций, делает расчет оценок эффективности перевозки для каждого используемого в системе алгоритма и выбирает лучший в данный момент, после чего высылает планы перевозки бортовым системам инфобусов для выполнения. После завершения перевозки инфобусы пересылают серверу отчеты о ее выполнении.

**Заключение.** Появление и развитие информационно-транспортных систем является эволюционным шагом, обусловленным концентрацией населения в городах и слиянием транспортных и информационных технологий. Подавляющее большинство внедренных на данный момент ИТС на постсоветском пространстве представляют собой лишь локальные инфраструктурные сервисы, ориентированные в основном только на сбор данных о наблюдаемом объекте. В работе представлена концепция городской пассажирской информационно-транспортной системы, способной адаптивно без участия человека реагировать на колебания пассажирского спроса на перевозку в режиме реального времени. Это достигается за счет таких особенностей, как:

- движение транспортных средств по выделенной линии (рельс или выделенная полоса), что позволяет эффективно использовать скоростную перевозку;
- использование в качестве системы интеллектуального информационного сервера, осуществляющего сбор, анализ данных о запросах на перевозку и организацию в режиме реального времени перевозки;
- способность управляющей системы формировать в режиме реального времени транспортное средство нужной в данный момент пассажировместимости;
- использование в управлении перевозками интеллектуальных алгоритмов скоростной перевозки, позволяющих пассажирам достичь пункта назначения с минимальным числом промежуточных остановок, а транспортному средству не делать ненужные остановки;
- выбор при организации перевозки наиболее оптимального алгоритма для нее в данный момент.

Рассматриваемая городская пассажирская ИТС на основе беспилотных электрокаров является замкнутой, т.е. способной функционировать без участия человека. Информационные процессы (сбор информации, обработка информации, принятие решений) протекают в ней постоянно и составляют основу информационной транспортной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shviatsova E.V., Shuts V.N. The Intellectual Transport with Divisible Parts // Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Studies in Systems, Decision and Control / A.G. Kravets, A.A. Bolshakov, M. Shcherbakov (Eds). – Cham: Springer, 2022. – Vol. 416. DOI: 10.1007/978-3-030-95112-2\_22
2. Shviatsova A., Shuts V. The smart urban transport system based on robotic vehicles // Artificial Intelligence. – 2019. – № 3–4(85–86). – P. 40–49. DOI: 10.15407/jai2019.03-04.040
3. Shviatsova A., Shuts V. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system // Artificial Intelligence. – 2020. – № 1. – P. 14–18. DOI: 10.15407/jai2020.01.014

4. Shuts V., Shviatsova A., Prolisko E. Collection and analysis of data for organization of transportation in the city passenger information and transportation system // *Applied questions of mathematical modelling*. – 2021. – Т. 4, № 2.1. – Р. 284–293. DOI: 10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.2.1.30
5. Швецова Е.В., Шуть В.Н. О построении графика движения транспортных средств в городской пассажирской транспортной системе // *Вестн. БелГУТа: Наука и Транспорт*. – 2021. – № 2. – С. 21–24.
6. Shuts V., Shviatsova A. The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system // *Artificial Intelligence*. – 2021. – № 26(2). – Р. 104–109. DOI: 10.15407/jai2021.02.104
7. Антошвили М.Е., Либберман С.Ю., Спириин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. – М.: Транспорт, 1985. – 102 с.
8. Швецова Е.В., Шуть В.Н. Алгоритм организации перевозок на основе критического элемента матрицы корреспонденций // *Транспорт Урала*. – 2023. – № 2(77). – С. 34–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-34-40

## REFERENCES

1. Shviatsova, E.V. & Shuts, V.N. (2022). The Intellectual Transport with Divisible Parts. In A.G. Kravets, A.A. Bolshakov, M. Shcherbakov (Eds). *Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Studies in Systems, Decision and Control*: Vol. 416. Cham: Springer. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95112-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95112-2_22)
2. Shviatsova, A.V. & Shuts, V.N. (2019). The smart urban transport system based on robotic vehicles. *Artificial Intelligence*, 3–4(85–86), 40–49. DOI: 10.15407/jai2019.03-04.040
3. Shviatsova, A.V. & Shuts, V.N. (2020). The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system. *Artificial Intelligence*, (1), 14–18. DOI: 10.15407/jai2020.01.014
4. Shuts, V., Shviatsova, A. & Prolisko, E. (2021). Collection and analysis of data for organization of transportation in the city passenger information and transportation system. *Applied questions of mathematical modelling*, 4 (2.1), 284–293. DOI: 10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.2.1.30
5. Shvetsova, E.V. & Shut', V.N. (2021). О построении графика движения транспортных средств в городской пассажирской транспортной системе. *Вестник БелГУТа: Наука и Транспорт*, (2), 21–24. (In Russ.)
6. Shuts, V. & Shviatsova, A. (2021). The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system. *Artificial Intelligence*, 26(2), 104–109. DOI: 10.15407/jai2021.02.104
7. Antoshvili, M.E., Liberman, S.Yu. & Spirin, I.V. (1985). *Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozk*. – Moscow: Transport. (In Russ.)
8. Shvetsova, E.V. & Shut', V.N. (2023). Algorithm organizatsii perevozk na osnove kriticheskogo elementa matritsy korrespondentsii [Algorithm for organizing transportation based on a critical element of the correspondence matrix]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2(77), 34–40. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 10.01.2024

### INFORMATION AND TRANSPORT SYSTEMS IN THE CONTEXT OF URBAN TRANSPORTATION

**A. SHVIATSOVA**  
(*Brest State Technical University*)

*A brief overview of information and transport systems implemented in the post-Soviet space is given. The concept of an information and transport system for urban passenger transportation based on unmanned electric vehicles is proposed, which implements a new technology for organizing the transportation process based on the use of intelligent control algorithms, transport with separable parts and high-speed transportation. The proposed methods of organizing transportation are aimed at ensuring the highest quality and timely service for system passengers with the most efficient use of rolling stock.*

**Keywords:** *Intelligent information transport system, transportation planning, transportation organization, passenger traffic forecasting, transportation plan, correspondence matrix, robotic vehicle, infobus.*

**ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 66-5

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-95-100

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА  
В ПРОГРАММЕ ANSYS НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА  
УСТАНОВКИ АВТ-2 ОАО «НАФТАН»**

*канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА, канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ,  
канд. хим. наук, доц. Е.В. МОЛОТОК, В.А. ТРУС*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Приводится описание современных систем автоматизированного проектирования теплообменного оборудования, объединенных общими задачами и математическими методами. Их главные отличия: адаптивность к восприятию 3D-моделей из других программ, удобство использования для проектировщика и способ предоставления отчетных данных. Рассмотрен способ проектирования теплообменного оборудования с применением программы Ansys Workbench с моделированием потоков течения жидкости методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** *моделирование, теплообмен, проектирование, течение жидкости, коэффициент теплопередачи, эффективность, химические процессы.*

**Введение.** Ни одно нефтехимическое и энергетическое производство не обходится без теплообменного оборудования – его доля составляет порядка 40%. И от правильности подобранного вида данных аппаратов напрямую зависит экономическая целесообразность и эффективность производств. В прошлом проектирование и конструирование осуществлялись вручную. Процесс был трудоемким и отнимал много времени, что косвенно увеличивало конечную стоимость проекта. Коэффициенты запаса, введенные для нивелирования дополнительных рисков, погрешностей и допущений в расчетах, увеличивали массу аппарата, его металлоемкость, что в итоге удорожало сами аппараты. Однако с появлением систем автоматизированного проектирования процесс разработки представилось возможным ускорить, а компьютерные мощности позволили моделировать теплообменные процессы и процессы течения жидкостей для нахождения оптимальной конструкции в соотношении цена и эффективность.

При проектировании и конструировании теплообменных аппаратов необходимо в максимально возможной степени удовлетворить многосторонние и часто противоречивые требования, предъявляемые к теплообменникам. Основные из них: соблюдение условий протекания технологического процесса; возможно более высокий коэффициент теплопередачи; низкое гидравлическое сопротивление аппарата; устойчивость теплообменных поверхностей против коррозии; доступность поверхности теплопередачи для чистки; технологичность конструкции с точки зрения ее изготовления; экономное использование материалов [1].

**Основная часть.** Различают проектный и поверочный расчеты теплообменников. Целью проектного расчета является определение необходимой поверхности теплообмена и режима работы теплообменника для обеспечения заданного переноса теплоты от одного теплоносителя к другому. Задача поверочного – определение количества передаваемой теплоты и конечных температур теплоносителей в данном теплообменнике с известной поверхностью теплообмена при заданных условиях его работы. Эти расчеты основываются на использовании уравнений теплопередачи и тепловых балансов [1].

При расчете теплообменника, как и любого другого аппарата для проведения химико-технологического процесса, не представляется возможным только на основе величин, имеющихся в задании на проектирование, однозначно определить все необходимые размеры и характеристики аппарата. Так, для расчета коэффициентов теплоотдачи необходимо задаться скоростью движения теплоносителя, диаметром труб и т.д. Значит, проектировщик при расчетах теплообменников к заданным (в проектном задании) величинам вынужден добавлять ряд других величин, которые часто выбираются произвольно. Поэтому приходится делать ряд вариантов расчета, для того чтобы выбрать наиболее рациональный. При таком методе расчета теплообменников объем расчетных вариантов, да и сам выбор аппарата, во многом зависит от субъективных факторов. Поэтому наиболее рационально расчет и выбор аппарата для проведения химико-технологического процесса, в т.ч. и теплообменного, рассматривать как задачу оптимизации. При этом все достоинства теплообменника выражаются только одной величиной – критерием оптимальности [1].

При оптимизации расчет направлен на поиск варианта, для которого критерий оптимальности будет иметь экстремальное значение (наибольшее или наименьшее в зависимости от содержания критерия). Проектирование теплообменников для этих установок должно быть подчинено основной задаче – обеспечению их высокой экономической эффективности [1].

С активным развитием технологий математического моделирования, в основе которых лежат фундаментальные уравнения гидродинамики, стало возможно расчетным путем определять параметры потока различных сред (давления, скорости) с определением характеристик конвективного теплообмена между твердой поверхностью теплопередающего элемента и текущего теплоносителя [2].

Для решения задач гидродинамики тепловых потоков в теплообменном и любом другом оборудовании существует ряд программ и систем, а именно Ansys CFD, программные модули в Kompas Flow, SolidWorks Flow Simulation, Autodesk Simulation CFD, FlowVision и др. Среда ANSYS Workbench является основным инструментом, на котором базируется концепция «Проектирование изделий на основании результатов инженерных расчетов» [3]. Ansys включает в себя множество модулей, которые разбиты на разделы.

Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные<sup>1</sup>:

1) тип теплообменного аппарата (кожухотрубчатый, пластинчатый, ребристый, оросительный, погружной или др.);

2) теплоносители (газ, пар или жидкость);

3) теплопроизводительность аппарата: расход одного из теплоносителей, его начальная и конечная температуры.

По ходу выполнения расчета определяют<sup>1</sup>:

1) физические параметры и скорости движения теплоносителей;

2) расход другого теплоносителя из уравнения теплового баланса;

3) среднюю разность температур;

4) коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи;

5) поверхность теплообмена;

6) конструктивные размеры аппарата;

7) диаметр патрубка для входа и выхода теплоносителей.

Любой расчет теплообмена стоит начинать с задания теплофизических свойств теплоносителей горячей и холодной сторон. Для этого создаем новый New Case. С помощью команды в поле программы выбираем  Hot Fluid Properties и  Cold Fluid Properties соответственно и в открывшемся окне нажимаем Property Generator. В появившемся меню выбираем вкладку Condition, где указываем диапазон работы аппарата, а именно давление и температуры, при которых потенциально может работать наш будущий теплообменник и для которых будут автоматически сгенерированы свойства теплоносителей при различных условиях (рисунок 1).

После задания границ по температуре и давлению задаем ориентировочный фракционный состав компонентов теплоносителей с помощью команды Composition. Исходя из этого состава, программа будет дробить компоненты на более мелкие фракции и вычислять для них плотность, вязкости, теплопроводность и т.д. (рисунок 2).

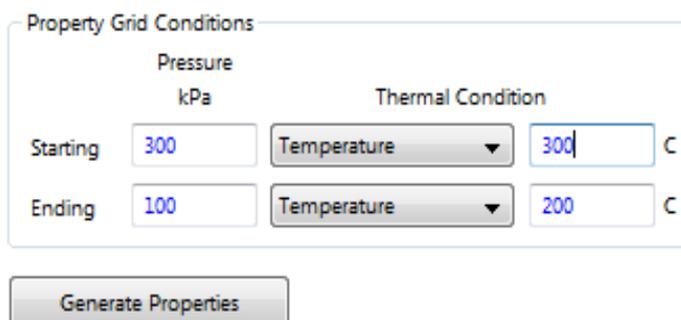


Рисунок 1. – Границы генерации свойств

	Percent Distilled	Temperature C
1	1.80	28.00
2	3.76	46.00
3	5.90	70.00
4	7.14	84.00
5	17.53	166.00
6	28.00	240.00
7	38.24	312.00
8	51.86	408.00
9	62.88	490.00

Рисунок 2. – Фракционный состав

После задания всех условий нажимаем на вкладку Results. В ней будут находиться все сгенерированные свойства при различных температурах и давлениях, которые будут использованы для расчета теплообмена (рисунок 3).

Аналогично горячему теплоносителю такой же набор действий необходимо сделать и для холодного теплоносителя с генерацией его свойств.

<sup>1</sup> Расчет теплообменных аппаратов. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию [Электронный ресурс] / сост. Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин. – Волгоград: Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т, 2013. URL: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/>

Pressure: 300,000 kPa			Vapor Properties					Liquid Properties							
Temperature (C)	Enthalpy (kJ/kg)	Weight Fraction Vapor	Density (kg/m3)	Viscosity (mN-s/m2)	Heat Capacity (kJ/kg-C)	Thermal Cond. (W/m-C)	Mole. Weight (-)	Density (kg/m3)	Viscosity (mN-s/m2)	Heat Capacity (kJ/kg-C)	Thermal Cond. (W/m-C)	Surface Tension (mN/m)	Critical Pres. (kPa)	Critical Temp. (C)	Mole. Weight (-)
1	300,000	0,21466	10,4768	0,0107	2,4079	0,0358	153,78	735,663	0,5347	2,7287	0,0690	11,7417	2030,40	517,31	268,78
2	298,812	0,20699	10,4668	0,0107	2,4046	0,0357	153,30	735,389	0,5332	2,7257	0,0692	11,7519	2037,00	515,81	267,23
3	297,633	0,19933	10,4567	0,0107	2,4013	0,0356	152,83	735,121	0,5318	2,7227	0,0693	11,7622	2043,57	514,33	265,70
4	296,462	0,19166	10,4462	0,0107	2,3980	0,0355	152,35	734,858	0,5305	2,7198	0,0695	11,7726	2050,09	512,87	264,19
5	295,298	0,18400	10,4356	0,0107	2,3947	0,0354	151,87	734,601	0,5292	2,7168	0,0697	11,7831	2056,58	511,41	262,70
6	294,140	0,17633	10,4246	0,0107	2,3915	0,0353	151,39	734,349	0,5264	2,7139	0,0698	11,7938	2063,04	509,97	261,23
7	292,988	0,16866	10,4133	0,0107	2,3883	0,0352	150,91	734,104	0,5225	2,7110	0,0699	11,8047	2069,46	508,54	259,78
8	291,841	0,16100	10,4017	0,0106	2,3851	0,0351	150,43	733,864	0,5212	2,7081	0,0701	11,8159	2075,85	507,13	258,35
9	290,507	0,15205	10,3878	0,0106	2,3814	0,0350	149,87	733,594	0,5197	2,7047	0,0702	11,8292	2083,26	505,49	256,71
10	289,178	0,14311	10,3733	0,0106	2,3777	0,0349	149,30	733,333	0,5184	2,7014	0,0703	11,8429	2090,64	503,87	255,09
11	287,852	0,13416	10,3584	0,0106	2,3740	0,0348	148,73	733,082	0,5172	2,6980	0,0705	11,8570	2097,97	502,26	253,49
12	286,527	0,12522	10,3430	0,0106	2,3703	0,0347	148,15	732,842	0,5162	2,6946	0,0706	11,8715	2105,28	500,66	251,91
13	285,202	0,11627	10,3270	0,0106	2,3667	0,0346	147,57	732,613	0,5152	2,6912	0,0708	11,8866	2112,56	499,07	250,36
14	283,875	0,10733	10,3105	0,0106	2,3630	0,0345	146,98	732,395	0,5143	2,6878	0,0709	11,9022	2119,82	497,50	248,83
15	282,735	0,09966	10,2958	0,0106	2,3599	0,0344	146,47	732,218	0,5137	2,6849	0,0710	11,9161	2126,02	496,15	247,53
16	281,592	0,09200	10,2807	0,0106	2,3568	0,0343	145,95	732,049	0,5131	2,6819	0,0711	11,9304	2132,21	494,81	246,24
17	280,445	0,08433	10,2651	0,0105	2,3536	0,0343	145,43	731,890	0,5122	2,6790	0,0712	11,9452	2138,40	493,48	244,97
18	279,293	0,07666	10,2491	0,0105	2,3505	0,0342	144,91	731,741	0,5107	2,6760	0,0713	11,9606	2144,58	492,15	243,71
19	278,134	0,06900	10,2326	0,0105	2,3473	0,0341	144,37	731,601	0,5103	2,6730	0,0715	11,9764	2150,76	490,83	242,46

Рисунок 3. – Результаты генерации свойств

Далее на вкладке  Process необходимо задать расходы теплоносителей  $G$ , вписав их (в кг/с) в графу Flow rate 32,6364; начальное и конечное значения температуры (если нет конечной, то программа посчитает, но для этого необходимо для первого приближения дать ей геометрические размеры теплообменника) в соответствующие графы Temperature 231 °C и 209 °C; допустимый перепад давления в аппарате Allowable pressure drop 50 кПа; рабочее давление теплоносителя на входе в аппарат Operating pressure 190 кПа. В графе Phase необходимо выбрать из выдвигающегося списка фазовое состояние теплоносителя: All liquid будет означать, что входит и выходит из аппарата только жидкость без фазового перехода; Condensing – в теплообменнике происходит конденсация данного теплоносителя, и если на входе поток был газообразным, то на выходе либо жидкость либо газожидкостная смесь; All vapor назначается в случае, если в теплообменник входит и выходит газ; Two phase\ No phase change – в аппарат входит и выходит двухфазный поток, меняться могут только соотношения газа и жидкости (рисунок 4).

	Hot Fluid		Cold Fluid	
Fluid name	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Phase	All liquid		All liquid	
Flow rate	32.6364		12.854 kg/s	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Weight fraction vapor	0	0	0	0
Temperature	231	209	132	168 C
Operating pressure	190		230 kPa	

Рисунок 4. – Условия процесса

После задания всех вышеперечисленных исходных данных появляется возможность задать геометрию аппарата. При первом приближении этим можно пренебречь и запустить расчет в режиме Design. Для этого необходимо нажать на кнопку  и подождать, пока программа подберет оптимальное решение поставленной задачи. После завершения расчета на вкладке Reports будет выдан отчет расчета, проанализировав который можно, меняя геометрию аппарата, повысить эффективность теплообменника (рисунок 5).

Данная техническая спецификация демонстрирует основные параметры работы аппарата и может служить в качестве опросного листа для поставщика оборудования. Исходя из результатов расчета, видим крайне низкую скорость движения теплоносителя в межтрубном пространстве теплообменника 0,14 м/с, что не соответствует рекомендованной скорости 1,5–2 м/с [5]. В нижней части теплообменника наблюдается застойная зона с малыми скоростями потока и плохой теплопередачей, в верхней части поток не доходит до теплообменных трубок и, минуя их, устремляется к выходу. Низкая скорость потока обуславливается тем, что жидкости нужно большее время контакта с трубками для достижения необходимой температуры на выходе. Нормальный теплообмен протекает только в центральной части, где трубки омываются полностью.

PERFORMANCE OF ONE UNIT				
Fluid Allocation	Shell Side		Tube Side	
Fluid Name				
Fluid Quantity, Total	117491		46275	
Vapor (In/Out)			1063,2	
Liquid	117491	117491	46275	45211
Steam				
Water				
Noncondensables				
Temperature (In/Out)	C	231,00	209,00	132,00
Specific Gravity		0,7645	0,7823	0,8363
Viscosity	mN-s/m <sup>2</sup>	0,8456	1,1981	50,420
Molecular Weight, Vapor			V/L 15,592	
Molecular Weight, Noncondensables				
Specific Heat	kJ/kg-C	2,5146	2,4368	2,2445
Thermal Conductivity	W/m-C	0,0790	0,0824	0,0944
Latent Heat	kJ/kg			V/L 0,0893
Inlet Pressure	kPa	190,00		230,00
Velocity	m/s	0,14		1,33
Pressure Drop, Allow/Calc	kPa	0,000	2,498	0,000
Fouling Resistance (min)	m <sup>2</sup> -kW	0,000000		0,000000
Heat Exchanged	1465064 W			MYD (Corrected) 65,8 C
Transfer Rate, Service	53,21 W/m <sup>2</sup> -K	Clean 57,51	W/m <sup>2</sup> -K	Actual 57,51 W/m <sup>2</sup> -K

Рисунок 5. – Результаты расчета в режиме Design

Для наглядности выведем полученную геометрию из модуля Workbench в модуль Fluent и проанализируем пространственное распределение тепловых потоков в полученном теплообменнике. Для этого перейдем на вкладку **Drawings** и откроем опцию **3D Bundle Layout**. Получим анимацию движения теплоносителей и распределение тепловых потоков по объему теплообменника (рисунок 6).

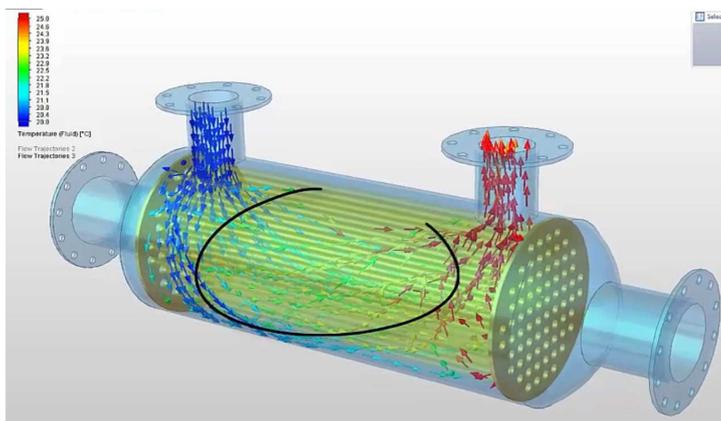


Рисунок 6. – Динамическая модель 3D вида теплообменника

На данном рисунке продемонстрированы тепловые потоки, движущиеся в аппарате; в левом верхнем углу расположена шкала температур с цветовым распределением, им соответствует цвет стрелок потока в аппарате. Для турбулизации потока изменим конструкцию теплообменника, расставив сегментные перегородки<sup>2</sup>.

Для этого следует зайти во вкладку **Geometry** и в открывшемся списке выбрать **Baffles**. Открывается меню настройки перегородок межтрубного пространства (рисунок 7).

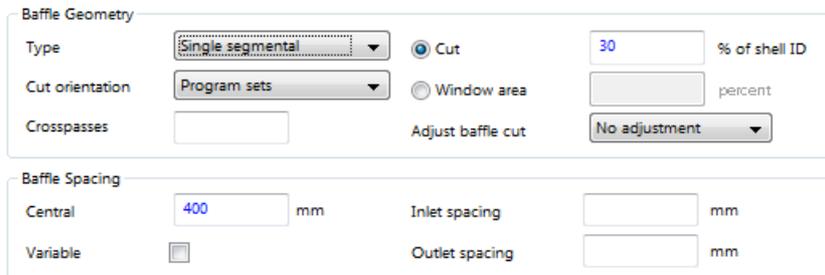


Рисунок 7. – Меню настройки перегородок межтрубного пространства

<sup>2</sup> Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справ. В 3 т. – Калуга: изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – С. 646–770.

На рисунке видны настройки выреза сегмента – 30%. Расстояние между перегородками назначаем исходя из рекомендаций – 400 мм. Программа дает возможность выбрать и другие варианты перегородок, таких как: Double segmental (двойной сегмент), Rods (стрельневая), Single helical (одинарная спираль). Однако в наших условиях достаточно простой в изготовлении односегментной перегородки.

В выбранном режиме расчета программа сразу предоставляет оптимальную скорость по трубному пространству.

Но рассмотрим случай, когда появляется необходимость решать аналогичную проблему для труб. Для изменения геометрии трубного пространства воспользуемся функцией **Tubes**. В ней есть возможность задать внутренний диаметр труб Tube OD, толщину стенки труб Average wall thickness, шаг труб Pitch, а также угол их расположения Tube layout angle. Варьируя эти параметры, можно достичь необходимых показателей скоростей и увеличить общий коэффициент теплопередачи. Повторяем расчет и просматриваем отчет расчета измененной конструкции (рисунок 8).

HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET					
<b>Ansys</b>			Job No.		
Customer			Reference No.		
Address			Proposal No.		
Plant Location			Date 17.03.2023		Rev
Service of Unit			Item No.		
Size	977,77 x 6096 mm	Type AES	Horizontal	Connected In 1	Parallel 1 Series
Surf/Unit (Gross/Eff)	432,69 / 419,62 m <sup>2</sup>	Shell/Unit 1		Surf/Shell (Gross/Eff)	432,69 / 419,62 m <sup>2</sup>
PERFORMANCE OF ONE UNIT					
Fluid Allocation		Shell Side		Tube Side	
Fluid Name					
Fluid Quantity, Total	kg/hr	117491		48275	
Vapor (In/Out)					
Liquid		117491	117491	48275	1062,7
Steam					45212
Water					
Noncondensables					
Temperature (In/Out)	C	231,00	209,00	132,00	168,00
Specific Gravity		0,7645	0,7823	0,8363	0,8191
Viscosity	mN-s/m <sup>2</sup>	0,8456	1,1981	50,420	V/L 15,591
Molecular Weight, Vapor					
Molecular Weight, Noncondensables					
Specific Heat	kJ/kg-C	2,5146	2,4368	2,2445	V/L 2,3586
Thermal Conductivity	W/m-C	0,0790	0,0824	0,0944	V/L 0,0893
Latent Heat	kJ/kg				
Inlet Pressure	kPa		190,00		230,00
Velocity	m/s		1,28		1,33
Pressure Drop, Allow/Calc	kPa	0,000	8,523	0,000	20,882
Fouling Resistance (min)	m <sup>2</sup> -K/W		0,000000		0,000000
Heat Exchanged	1365054 W			MTD (Corrected)	86,5 C
Transfer Rate, Service	52,21 W/m <sup>2</sup> -K	Clean	75,30 W/m <sup>2</sup> -K	Actual	75,30 W/m <sup>2</sup> -K
CONSTRUCTION OF ONE SHELL					
		Shell Side		Tube Side	
Design/Test Pressure	kPaG	517,11 /		517,11 /	
Design Temperature	C	260,00		198,89	
No Passes per Shell		1		1	
Corrosion Allowance	mm	3,175		3,175	
Connections	In mm	1 @ 187,30		1 @ 187,30	
	Out mm	1 @ 337,30		1 @ 187,30	
Rating	Intermediate	@		@	

Рисунок 8. – Результаты расчета измененной конструкции

В динамической модели данное изменение представлено на рисунке 9.

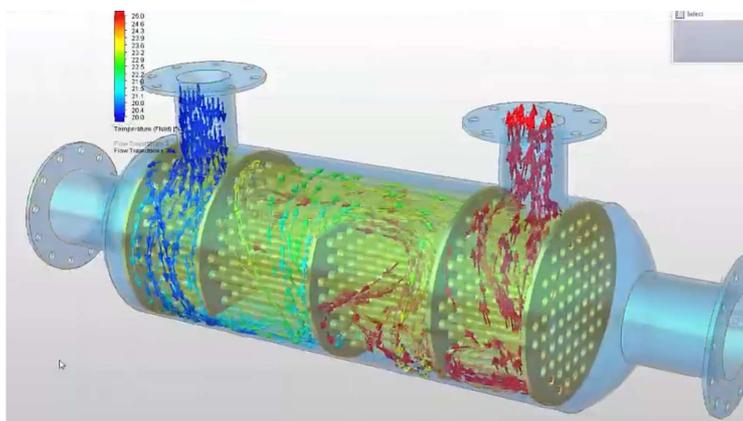


Рисунок 9. – Динамическая модель 3D вида измененного теплообменника

**Заключение.** Анализ данных показал увеличение коэффициента теплопередачи с 57 до 75 Вт/м<sup>2</sup>\*К, к рекомендованным значениям приведена скорость потока с 0,14 до 1,28 м/с. Из негативных моментов изменения конструкции наблюдается увеличения перепада давлений вследствие увеличения гидравлического сопротивления, однако перепад не превышает заложенных допустимых значений в 50 кПа. Таким образом, программа Ansys позволяет проводить моделирование и оптимизацию работы теплообменных аппаратов, что необходимо при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Показано преимущество программы Ansys и рекомендовано ее использование при проектировании и оптимизации теплообменного оборудования. Может быть использована проектными организациями, проектно-конструкторскими отделами нефтехимических производств, а также студентами вузов в ходе курсового и дипломного проектирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. В 2 кн. – М.: Химия, 1995. – Кн. 1: Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – 400 с.
2. Сравнительный анализ параметров противоточного теплообменника, полученных по методике компьютерной гидродинамики и практической методике проектирования теплообменных аппаратов / А.В. Жаров, А.А. Павлов, В.В. Власов и др. // Фундам. исслед. – 2013. – № 11-3. – С. 423–429.
3. Шилиев С.А., Екатериничева Е.И. Расчет конструкции матрицы пресс-формы с запрессованными знаками в программном комплексе Ansys Workbench / Вестн ИжГТУ. – 2018. – № 12-2. – С. 123–125.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – 10-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Химия, 1987. – 576 с.

#### REFERENCES

1. Dytnerkii, Yu.I. (1995). *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii*: v 2 kn. Kn. 1. *Teoreticheskie osnovy protsessov khimicheskoi tekhnologii. Gidromekhanicheskie i teplovyie protsessy i apparaty*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Zharov, A.V., Pavlov, A.A., Vlasov, V.V., Favstov, V.S. & Gorshkov, R.V. (2013). Sravnitel'nyi analiz parametrov protivotochno-go teploobmennika, poluchennykh po metodike komp'yuterno gidrogazodinamiki i prakticheskoi metodike proektirovaniya teploobmennyykh apparatov. *Fundamental'nye issledovaniya*, 11-3, 423–429. (In Russ.)
3. Shilyaev, S.A. & Ekaterinicheva, E.I. (2018). Raschet konstruktssii matritsy press-formy s zapressovannymi znakami v programnom komplekse Ansys Workbench [Calculation of the design of a mold matrix with pressed signs in the Ansys Workbench software package]. *Vestnik IzhGTU [Vestnik IzhSTU]*, 12-2, 123–125. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Pavlov, K.F., Romankov, P.G. & Noskov, A.A. (1987). *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 21.11.2023

### COMPUTER SIMULATION AND OPTIMIZATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN ANSYS SOFTWARE USING THE EXAMPLE OF HEAT EXCHANGER INSTALLATION AVT-2 JSC “NAFTAN”

*E. SAFRONOVA, A. SPIRIDONOV, E. MOLOTOK, V. TRUS*  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article provides a description of modern computer-aided design systems for heat exchange equipment, which are united by common tasks and mathematical methods; their most important differences will be adaptability to the perception of 3D models from other programs, ease of use for the designer and the method of providing reporting data. This article discusses a method for designing heat exchange equipment using the Ansys Workbench program with fluid flow modeling using the finite element method.*

**Keywords:** modeling, heat transfer, design, fluid flow, heat transfer coefficient, efficiency, chemical processes.

УДК 621.64: 331.461

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-101-106

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

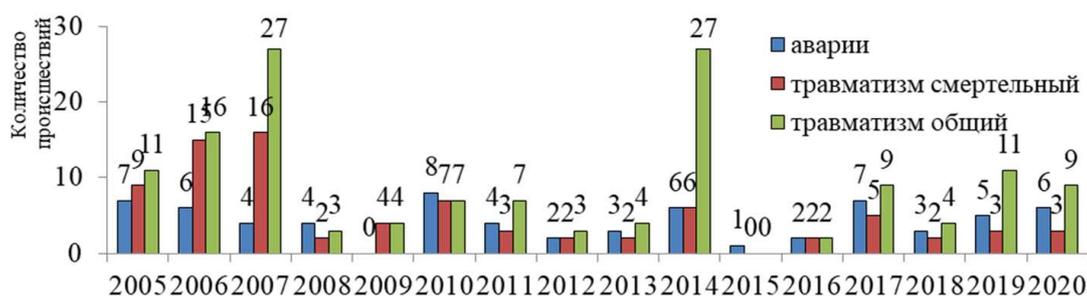
*канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, К.Ю. КОЖЕМЯТОВ*  
(*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой*)

*Выполнен комплексный анализ правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением. Разработан алгоритм проведения неразрушающего контроля оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии, при возникновении технико-экономических сложностей с проведением внутреннего осмотра, связанного с выгрузкой и загрузкой катализатора, адсорбента или иного вещества, насадки, других внутренних устройств, для выгрузки которых необходима пропарка, способная привести к ухудшению свойств, потере каталитической активности и адсорбционной емкости, механическому разрушению, невозможности регенерации после контакта с атмосферным воздухом и потребует их замены. Внедрение предлагаемого комплекса мер проведения неразрушающего контроля оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии, будет способствовать повышению уровня промышленной безопасности, снижению риска возникновения аварий, инцидентов и травм на производстве.*

**Ключевые слова:** авария, оборудование, работающее под избыточным давлением, правила по обеспечению промышленной безопасности.

**Введение.** Состояние аварийности на производстве продолжает оставаться сложной социально-экономической проблемой, в т.ч. при эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) и потенциально опасных объектов (ПОО), на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением [1–3]. Предприятия нефтеперерабатывающей отрасли промышленности относятся к наиболее взрывопожароопасным объектам, что обусловлено высокой концентрацией ОПО и ПОО. Типовой нефтеперерабатывающий завод производительностью 10–12 млн т нефти в год сосредотачивает на своей территории около 4000 единиц оборудования, работающего под избыточным давлением (колонного, емкостного и реакторного типов, теплообменного оборудования, сепараторов, фильтров и пр.) [3; 4].

На рисунке 1 приведена динамика аварийности и смертельного травматизма при эксплуатации ОПО и ПОО, использующих оборудование, работающее под избыточным давлением, в Российской Федерации, по данным Ростехнадзора, осуществляющего федеральный государственный надзор в области промышленной безопасности за более чем 4 300 опасными производственными объектами нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих производств и объектов нефтепродуктообеспечения. Так, за период 2005–2020 гг. произошло 68 аварий и 144 травмы, из которых с летальным исходом 81 случай.



**Рисунок 1. – Динамика аварийности и травматизма при эксплуатации ОПО, использующих оборудование, работающее под избыточным давлением Российской Федерации за 2005–2020 гг.**

Экспертами Ростехнадзора в результате технического расследования причин происшествий установлено, что основными причинами, способствующими возникновению аварий на ОПО, являются ошибочные действия эксплуатирующего персонала и сервисных организаций, не соблюдающих установленные на законодательном уровне требования в области промышленной и пожарной безопасности при техническом обслуживании и ремонте основного технологического и вспомогательного оборудования, в т.ч. связанные с выполнением огневых и газоопасных работ. При этом более половины всех аварий и производственных травм обусловлены некачественным обслуживанием, освидетельствованием, диагностированием и экспертизой промышленной безопас-

ности оборудования, работающего под избыточным давлением, а также бесконтрольной эксплуатацией оборудования, израсходовавшего расчетный срок службы<sup>1</sup> [5–11].

Коррозионно-эрозионный физический износ из-за длительных сроков эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, является основной причиной разгерметизации и разрушения технических устройств.

Согласно ежегодным статистическим данным Департамента по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь выполнен анализ состояния аварийности и травматизма на опасных производственных объектах Республики Беларусь за период 2009–2021 гг. Динамика состояния аварийности и травматизма по на ОПО Республики Беларусь за период 2009–2021 гг. приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Количество происшествий (аварий, инцидентов, несчастных случаев) на опасных производственных объектах Республики Беларусь за период 2009–2021 гг.

Вид надзора/ период наблюдения	Оборудование, работающее под избыточным давлением и тепловые электростанции		Химическая промышленность		Подъемные сооружения и аттракционы		Системы газоснабжения и магистральные трубопроводы		Горные и взрывные работы, металлургические производства		Перевозка опасных грузов		Несчастных случаев	
	аварии	инциденты	аварии	инциденты	аварии	инциденты	аварии	инциденты	аварии	инциденты	аварии	инциденты	общих	летальных
2009	–	–	1	4	6	1	–	–	–	2	1	28	14	3
2010	–	–	1	5	4	–	1	–	3	1	1	17	32	15
2011	–	–	–	3	4	1	–	–	1	–	–	17	19	8
2012	–	–	1	3	1	–	1	2	1	–	–	1	15	6
2013	1	1	1	1	–	1	–	2	–	–	–	–	11	2
2014	1	–	–	2	–	2	–	–	1	–	–	–	10	3
2015	–	–	–	3	3	2	–	–	1	–	–	1	7	2
2016	–	1	1	7	–	3	1	18	1	3	–	–	6	4
2017	–	–	–	6	1	–	–	7	–	2	–	2	4	1
2018	–	–	–	7	2	4	1	5	1	3	–	6	2	1
2019	–	2	–	3	1	9	–	10	–	3	1	9	2	1
2020	–	2	–	6	–	5	–	6	–	1	–	7	0	0
2021	1	2	–	6	–	6	–	1	–	1	–	5	0	0
Всего	3	8	5	56	22	34	4	51	9	16	3	93	122	46

За рассматриваемый период зарегистрировано 46 аварий и 258 инцидентов, последствиями которых стали 122 несчастных случая, из них 46 с летальным исходом (общее количество пострадавших 149 человек, в т.ч. смертельно 52). Наибольшее количество аварий связано с эксплуатацией грузоподъемных сооружений и превышением грузоподъемности кранов, повреждением, неисправностью (выходом из строя) либо отсутствием приборов безопасности (ограничителя грузоподъемности и пр.). Наибольшее количество инцидентов отмечается при перевозке опасных грузов и эксплуатации ОПО и ПОО в химической промышленности. За рассматриваемый период зарегистрировано 3 аварии и 5 инцидентов при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и на тепловых электростанциях, как правило обусловленных недостаточным уровнем производственной и технологической дисциплины и производственного контроля<sup>2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup> [12].

<sup>1</sup> Новиков М.В. Состояние аварийности и травматизма при эксплуатации ОПО, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением [Электронный ресурс] // Пром. и эколог. безопасность. Охрана труда. – 2015. – № 6(103). – URL: <https://prominf.ru/article/sostoyanie-avariynosti-i-travmatizma-pri-ekspluatacii-opo-na-kotoryh-ispolzuyetsya>

<sup>2</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Проблемы обеспечения безопасности при эксплуатации теплообменного оборудования на НПЗ // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы пятой Всерос. студен. науч.-техн. конф. / Казань (23–25 мая 2018 г.). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – С. 403–406.

<sup>3</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Повышение надежности эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе // Нефть и газ – 2018: сб. докл. 72-й Междунар. молодеж. науч. конф. / Москва (23–26 апр. 2018 г.). – Т. 2. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. – С. 189.

<sup>4</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Анализ практического опыта эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе // Безопасность современных технологий в энергетике: сб. докл. Всерос. специализир. науч.-практ. конф. молодых специалистов (с междунар. участием) / Москва (29–30 марта 2018 г.). – М.: ВТИ, 2018. – С. 299–304.

<sup>5</sup> Булавка Ю.А., Кожемятов К.Ю. Анализ жизненного цикла оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии // Нефть и газ – 2019: сб. тез. 73-й Междунар. молодеж. науч. конф. / Москва (22–25 апр. 2019 г.). – Т. 5. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019. – С. 450–451.

Целью данного исследования является совершенствование алгоритма проведения неразрушающего контроля оборудования, работающего под избыточным давлением, эксплуатируемого на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли.

**Методы и объекты исследований.** В качестве объекта исследования принято оборудование, работающее под избыточным давлением на белорусском нефтеперерабатывающем предприятии полного цикла. Экспертно-аналитическими методами выполнен комплексный анализ «Правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением», на основе которого предложен новый алгоритм проведения неразрушающего контроля такого оборудования на НПЗ при возникновении технико-экономических сложностей с проведением внутреннего осмотра.

**Результаты и их обсуждение.** С целью предотвращения возникновения аварий, инцидентов и производственного травматизма работников ОПО в Республике Беларусь постоянно ведется работа по совершенствованию технических нормативных правовых актов (ТНПА). В частности, постановлением № 84 от 27 декабря 2022 г. Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь с 1 июня 2023 г. вступила в силу новая редакция «Правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (далее – Правил) – основного документа, регламентирующего безопасную эксплуатацию оборудования под давлением. К наиболее важным направлениям совершенствования Правил можно отнести следующие:

– Необходимость фиксирования в Правилах конкретной разбраковки с указанием допустимых/недопустимых дефектов и их размеров. В ранее действующей редакции Правил любые дефекты являлись недопустимыми, в т.ч. единичные поры, подрезы и т.д. При этом в ГОСТ 34347-2017, регламентирующем изготовление и ремонт сосудов и аппаратов, поры и подрезы могут классифицироваться как допустимые. В результате данного противоречия в ТНПА была необходимость проведения ремонта новых аппаратов за счет средств заказчика оборудования.

– Возможность замены внутреннего осмотра, связанного со значительными техническими сложностями выгрузки и загрузки при наличии в оборудовании катализатора и адсорбента, пневматическим испытанием с контролем методом акустической эмиссии, что наиболее актуально для нефтеперерабатывающих предприятий, где широко применяются реакторы и аппараты с катализаторами, адсорбентами и другими наполнителями. Эти вещества для сохранения рабочих свойств зачастую необходимо хранить и эксплуатировать при строго определенных регламентированных технологических параметрах: температуре, влажности и давлении. Процесс подготовки к внутреннему осмотру, пропарка аппарата могут привести к ухудшению свойств, негодности адсорбента, катализатора или иного вещества, а также насадки, других внутренних устройств, потере способностей и механическому разрушению из-за невозможности их регенерации после контакта с атмосферным воздухом. В связи с этим выгрузка аппарата с последующей дорогостоящей заменой наполнителя проблематична и не всегда реализуема в технологическом процессе, несмотря на значительные достижения в области импортозамещения. Для решения этой проблемы переносили срок внутреннего осмотра на основании результатов предыдущего обследования с установлением усиленного контроля. Нововведение облегчает проведение очередного технического освидетельствования, сокращает время подготовки оборудования. Вместе с тем возникает необходимость совершенствования данного направления для

<sup>6</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Направления повышения промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением на НПЗ // Безопасность – 2019: материалы докл. XXIV Всерос. студен. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Проблемы экологической и промышленной безопасности современного мира» / Иркутск (16–19 апр. 2019 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. – С. 56–58.

<sup>7</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Анализ ремонтной документации оборудования, работающего под избыточным давлением на НПЗ // Наука. Технология. Производство – 2019: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Респ. Башкортостан / редкол.: Н.Г. Евдокимова и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. – С. 174–176.

<sup>8</sup> Зайцев В.А., Булавка Ю.А., Кожемятов К.Ю. Анализ состояния промышленной безопасности при эксплуатации и проектировании технологических трубопроводов // Безопасность технологических процессов и производств: тр. III Междунар. науч.-техн. конф. / Екатеринбург (26 мая 2021 г.) / отв. ред. В.А. Елохин. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2021. – С. 60–64.

<sup>9</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Контроль и диагностика состояния оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающих производствах: направления совершенствования // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. / Новополюцк (8–9 дек. 2022 г.). – С. 73–75.

<sup>10</sup> Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Направления совершенствования правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVII междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / Минск (12–13 апр. 2023 г.). В 2 т. – Минск: УГЗ, 2023. – Т. 1. – С. 216–218.

<sup>11</sup> Булавка Ю.А., Кожемятов К.Ю. Направления повышения промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии // Здоровье и безопасность на рабочем месте: сб. науч. тр. по материалам конф. / Новополюцк-Полоцк (15–17 мая 2019 г.) // гл. ред. И.В. Бухтияров, Т.М. Рыбина. – Минск: Полиграфт, 2019. – Т. 1, вып. 3. – С. 47–51. DOI: 10.31089/978-985-7153-76-3

проведения ревизии и оценки текущего технического состояния оборудования, работающего под избыточным давлением, без доступа внутрь аппарата до исчерпания ресурса наполнителя (катализатора, адсорбента и пр.), а для некоторых единиц оборудования он составляет 20 лет.

– Разбраковка внутреннего защитного покрытия от воздействия температуры. В современных технологических процессах существует класс оборудования, защищенного от воздействия температуры рабочей среды с помощью внутренней теплоизоляционной футеровки. В действующих ТНПА отсутствуют сведения и нормы отбраковки для таких типов покрытий, а их техническое состояние напрямую связано с безопасностью эксплуатации термонагруженных сосудов, работающих под избыточным давлением. В частности, на действующем нефтеперерабатывающем предприятии при вскрытии котлов-утилизаторов установки получения элементарной серы с рабочей температурой 1300–1500 °С после проведения ревизии огнеупорного покрытия в котле-утилизаторе с более высоким технологическим режимом (1400 °С) выявлены значительные разрушения футеровочного покрытия по сравнению с котлом-утилизатором с рабочим температурным режимом в 1300–1340 °С, несмотря на заявленную производителем возможность применения огнеупорного материала до температуры 1800 °С. В процессе ремонта показала свою эффективность установка расклинивающих пластин из стали марки 20Х23Н18. Пластины позволяют дополнительно фиксировать огнеупорный кирпич в проектное положение. Однако требуется разработка эффективной методики ревизии и ремонта огнеупорного покрытия для аппаратов такого типа.

Таким образом, «Правила по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением», являясь основополагающим документом при ремонте, эксплуатации, модернизации таких аппаратов, характеризуются неполнотой. В частности, отсутствуют рекомендации по определению объемов неразрушающего контроля сварных соединений, норм отбраковки по твердости, – все это определяет необходимость их дальнейшего совершенствования.

На сегодня в нормативных документах описан и используется на практике следующий комплекс мероприятий (алгоритм) проведения неразрушающего контроля при проведении ревизии и оценки текущего состояния оборудования, работающего под избыточным давлением:

- 1) визуальный контроль наружной и внутренней поверхностей, выявление зон повышенного внимания для других методов контроля;
- 2) ультразвуковая толщинометрия; обязательному контролю подлежат основные элементы корпусов аппаратов (обечайки, днища – не менее 4 точек на каждом элементе), штуцера, обечайки люков лазов;
- 3) обстукивание молотком патрубков штуцеров.

По данной методике проведения ревизии основная информация о текущем состоянии конкретной единицы оборудования собирается в большей степени за счет визуального контроля внутренней поверхности оборудования, т.к. основной фактор износа связан с агрессивным воздействием рабочей среды на внутреннюю поверхность элементов корпуса.

В рамках данного исследования для проведения очередного технического освидетельствования оборудования, работающего под избыточным давлением на НПЗ, при возникновении технико-экономических сложностей с проведением внутреннего осмотра, требующего выгрузки и загрузки катализатора, адсорбента или иного вещества и других внутренних устройств, пропарка которых приводит к их негодности, ухудшению эксплуатационных свойств, потере адсорбционной емкости либо каталитической активности, механическому разрушению, невозможности регенерации после контакта с атмосферным воздухом, что потребует их последующей дорогостоящей замены, предложен алгоритм проведения неразрушающего контроля, включающий комплекс мероприятий по проведению ревизии оборудования:

- увеличение объема ультразвуковой толщинометрии с обязательным контролем толщины стенок аппаратов в местах ввода/вывода продуктов, увеличение количества точек замеров патрубков штуцеров с 4 до 8 точек;
- ультразвуковая дефектоскопия мест пересечений кольцевых и продольных сварных швов с чередованием мест проведения контроля;
- ультразвуковой контроль сплошности основного металла, а также получение непрерывной картины толщины металла на контролируемом участке;
- ультразвуковой контроль швов и околошовных зон врезок с условным проходом более  $D_s/200$  для аппаратов, работающих с температурой стенки более 250 °С;
- контроль отсутствия развивающихся дефектов пневматическим испытанием с контролем методом акустической эмиссии;
- составление для аппаратов индивидуальных карт контроля с определением, кроме чередующихся участков, также и постоянных, наиболее проблемных, мест контроля исходя из опыта практической эксплуатации конкретной единицы оборудования.

**Заключение.** Внедрение предложенного комплекса мер (алгоритма) проведения неразрушающего контроля оборудования, работающего под избыточным давлением на НПЗ, при возникновении технико-

экономических сложностей с проведением внутреннего осмотра будет способствовать повышению уровня промышленной безопасности, снижению риска возникновения аварий, инцидентов и травм на производстве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kozhemyatov K.Y., Bulauka Y.A. Analysis of equipment life cycle at oil refinery // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 687. – Art. No 066038. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066038
2. Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Направления повышения промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 3. – С. 125–128. DOI: 10.1201/9781003014638
3. Kozhemyatov K.Y., Bulauka Y.A. The improving of the safety level of the equipment working under excessive pressure // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. – 2020. – Vol. 2. – P. 822–831. DOI: 10.1201/9781003014638
4. Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А. Актуальные проблемы обеспечения безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 1(10). – С. 60–63.
5. Анализ аварийности и травматизма на опасных производственных объектах (ОПО) / Р.Р. Гаязов, Ю.А. Знаемский, В.С. Кадыев и др. // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2016. – № S4. – С. 3–11.
6. Анализ аварийности и травматизма при эксплуатации подъемных сооружений и оборудования, работающего под избыточным давлением / А.Н. Дерунов, В.Н. Данилов, И.И. Муравская и др. // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2015. – № S10–44. – С. 3–9.
7. Лаврик В.В. Анализ федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением» на соответствие законодательству в области обеспечения единства измерений // Законодат. и приклад. метрология. – 2023. – № 2(182). – С. 12–18.
8. Трещенко А., Петроченков А. Сроки периодического технического обследования оборудования, работающего под избыточным давлением // ТехНадзор. – 2015. – № 12(109). С. 484–485.
9. Особенности проведения экспертизы промышленной безопасности на объектах, эксплуатирующих оборудование под избыточным давлением / А.Н. Гришин, М.В. Гордина, О.В. Смирнов и др. // Научная мысль. – 2015. – № 4(18). – С. 39–43.
10. Чернышев В.В., Гонтаренко А.Ф. Классификация оборудования, работающего под избыточным давлением, по категориям опасности // Безопасность труда в пром-сти. – 2014. – № 9. – С. 44–47.
11. Гонтаренко А.Ф., Чернышев В.В., Вишняков П.Г. Обязательные требования безопасности к оборудованию, работающему под избыточным давлением // Безопасность труда в пром-сти. – 2012. – № 3. – С. 28–33.
12. Булавка Ю.А. Анализ производственного травматизма на нефтеперерабатывающем предприятии // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2011. – № 3. – С. 130–137.

## REFERENCES

1. Kozhemyatov, K.Y. & Bulauka, Y.A. (2019). Analysis of equipment life cycle at oil refinery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (687), art. No 066038. DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066038
2. Kozhemyatov, K.Yu. & Bulavka, Yu.A. (2019). Napravleniya povysheniya promyshlennoi bezopasnosti oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem na neftepererabatyvayushchem predpriyatii [Directions for increasing the industrial safety of equipment operating under excess pressure at an oil refinery]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 125–128. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Kozhemyatov, K.Y. & Bulauka, Y.A. (2020). The improving of the safety level of the equipment working under excessive pressure. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources* 2019, (2), 822–831. DOI: 10.1201/9781003014638
4. Kozhemyatov, K.Yu. & Bulavka, Yu.A. (2019). Aktual'nye problemy obespecheniya bezopasnosti pri ekspluatatsii oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem na neftepererabatyvayushchem predpriyatii. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii*, 1(10), 60–63. (In Russ.)
5. Gayazov, R.R., Znaemskii, Yu.A., Kadysev, V.S. & Marinin, I.A. (2016). Analiz avariinosti i travmatizma na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh (OPO) [Analysis of accidents and injuries at hazardous production facilities (HIF)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, S4, 3–11. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Derunov, A.N., Danilov, V.N., Muravskaya, I.I. & Larochkina, N.M. (2015). Analiz avariinosti i travmatizma pri ekspluatatsii pod"emnykh sooruzhenii i oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem [Analysis of federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules of industrial safety when using equipment operating under excessive pressure” for compliance with legislation in the field of ensuring the uniformity of measurements]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, S10–44, 3–9. (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Lavrik, V.V. (2023). Analiz federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Pravila promyshlennoi bezopasnosti pri ispol'zovanii oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem» na sootvetstvie zakonodatel'stvu v oblasti obespecheniya edinstva izmerenii [Analysis of federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules

- of industrial safety when using equipment operating under excessive pressure” for compliance with legislation in the field of ensuring the uniformity of measurements]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya [Legislative and applied metrology]*, 2(182), 12–18. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Treshchenko, A. & Petrochenkov, A. (2015). Sroki periodicheskogo tekhnicheskogo obsledovaniya oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem. *TekhNadzor*, 12(109), 484–485. (In Russ.)
  9. Grishin, A.N., Gordina, M.V., Smirnov, O.V. & Potekhin, A.A. (2015). Osobennosti provedeniya ekspertizy promyshlennoi bezopasnosti na ob"ektakh, ekspluatiruyushchikh oborudovanie pod izbytochnym davleniem [Features of conducting industrial safety examinations at facilities operating equipment under excess pressure]. *Nauchnaya mysl' [Scientific thought]*, 4(18), 39–43. (In Russ., in Engl.)
  10. Chernyshev, V.V. & Gontarenko, A.F. (2014). Klassifikatsiya oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem, po kategoriyam opasnosti [Classification of equipment operating under excess pressure by hazard categories]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor safety in industry]*, (9), 44–47. (In Russ., abstr. in Engl.)
  11. Gontarenko, A.F., Chernyshev, V.V. & Vishnyakov, P.G. Obyazatel'nye trebovaniya bezopasnosti k oborudovaniyu, rabotayushchemu pod izbytochnym davleniem [Mandatory safety requirements for equipment operating under excess pressure]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor safety in industry]*, (3), 28–33. (In Russ., abstr. in Engl.)
  12. Bulavka, Yu.A. (2011). Analiz proizvodstvennogo travmatizma na neftepererabatyvayushchem predpriyatii [Analysis of industrial injuries at an oil refinery]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 130–137. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 11.01.2024

**IMPROVING THE ALGORITHM  
FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF EQUIPMENT  
OPERATING UNDER EXCESSIVE PRESSURE**

**Y. BULAUKA, K. KOZHEMYATOV**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*A comprehensive analysis of the rules for ensuring industrial safety of equipment operating under excess pressure was carried out. An algorithm has been developed for conducting non-destructive testing of equipment operating under excess pressure at an oil refinery when technical and economic difficulties arise with carrying out an internal inspection associated with the unloading and loading of a catalyst, adsorbent, or other substance, nozzle, and other internal devices, the unloading of which requires steaming, which may lead to deterioration of properties, loss of catalytic activity and adsorption capacity, mechanical destruction, impossibility of regeneration after contact with atmospheric air and will require their replacement. The implementation of the proposed set of measures for non-destructive testing of equipment operating under excess pressure at an oil refinery will help improve the level of industrial safety and reduce the risk of accidents, incidents and injuries at work.*

**Keywords:** *accident, equipment operating under excess pressure, industrial safety regulations.*

УДК 665.7.038.5

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111

## АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СУЛЬФОНАТНЫХ ПРИСАДОК

Г. АННАЕВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-9872-0788>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>

Н.А. СОВЕТНИКОВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0005-8232-044X>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. техн. наук Б.М. МАММЕДОВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-7660-3505>

(Международный университет нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева, Ашхабад)

Исследованы антикоррозионные свойства сульфонатных присадок в смеси с гидрокрекинговым базовым маслом НС4. Приведены результаты исследования антикоррозионной эффективности сульфонатных присадок НССК-30, С-150, ССК-400. Выявлены закономерности изменения защитных свойств синтетических сульфонатных присадок в зависимости от величины их щелочного числа. Проведена качественная и количественная оценка эффективности использования сульфонатных присадок в смеси с базовым маслом НС4 в качестве ингибирующих составов для защиты стали от коррозии под действием электролита, в климатической камере и камере солевого тумана. Показано, что эффективность защитного действия ингибирующих составов возрастает с уменьшением щелочного числа сульфонатной присадки. Определен характер изменения поверхности стальных пластинок в процессе их коррозионного разрушения, сопровождающийся образованием питтингов.

**Ключевые слова:** сульфонатные присадки, ингибиторы коррозии, антикоррозионная эффективность, климатическая камера, камера солевого тумана, питтинговая коррозия.

**Введение.** Присадки выполняют в маслах две основные функции:

- восстанавливают свойства масляной основы, утраченные или ослабленные в процессах очистки;
- придают масляной основе новые свойства, которыми она первоначально не обладала [1].

Особое место среди присадок по универсальности применения, эффективности действия, объемам производства занимают сульфонатные присадки, обладающие моющими, диспергирующими, нейтрализующими и антикоррозионными свойствами [1].

Использование сульфонатов металлов в качестве присадок, ингибирующих коррозию, известно более 50 лет. Так, многие виды пленкообразующих ингибированных нефтяных составов, выпускаемых в США, Японии, странах Западной Европы, в качестве основного ингибитора коррозии содержат алкилбензолсульфонаты кальция, реже – натрия, бария, магния [2].

Механизм действия ингибиторов коррозии, в т.ч. сульфонатов, сложен. Считается, что происходят следующие основные явления: физическая адсорбция ингибиторов на металле → образование защитной пленки коллоидно-дисперсного ингибитора → образование поверхностных химических соединений [3].

Активная группа сульфонатных присадок обладает электронодонорными свойствами по отношению к данному металлу, поэтому сульфонаты относятся к ингибиторам анодного действия. Схематически взаимодействие подобных соединений и металла можно представить следующим образом (рисунок 1):

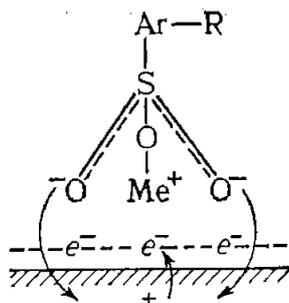


Рисунок 1. – Адсорбционное взаимодействие сульфоната с поверхностью металла [4]

Сульфонаты представляют собой соли сульфоновых кислот, имеющих общую формулу R-SO<sub>2</sub>OH, где R – углеводородный радикал различного строения [5]. В настоящее время сульфонатные присадки производят из синтетического сырья, в качестве которого выступают алкилбензол- и диалкилбензолсульфокислоты (соответственно, АБСК и ДАБСК).

В зависимости от содержания металла различают нейтральные, средне- и высокощелочные сульфонатные присадки. Нейтральные сульфонаты – это коллоидный раствор сульфоната в масле-разбавителе. Средне- и высокощелочные сульфонаты содержат дисперсию карбонатов, оксидов и гидроксидов металлов, стабилизированную коллоидной структурой сульфоната [1].

*Цель работы* – оценка антикоррозионных свойств сульфонатов с различным щелочным числом в смеси с гидрокрекинговым базовым маслом НС-4 с использованием стандартных методов лабораторных испытаний защитной способности консервационных материалов.

**Исследовательская часть.** В качестве объектов исследования использовались следующие кальцийсодержащие сульфонатные присадки к базовым маслам:

- НССК-30 ТУ ВУ 390401182-022-2011 – раствор нейтрального синтетического сульфоната кальция в минеральном масле, произведенного на основе ДАБСК;
- С-150 ТУ ВУ 38.101685-84 – раствор среднещелочного синтетического сульфоната кальция в минеральном масле;
- ССК-400 ТУ ВУ 390401182.022-2011 – раствор высокощелочного синтетического сульфоната кальция в минеральном масле, произведенного на основе АБСК.

Физико-химическая характеристика объектов исследования представлена в таблице.

Таблица. – Физико-химические свойства сульфонатных присадок

Наименование показателя	НССК-30	С-150	ССК-400
Вязкость кинематическая при 100 С°, мм <sup>2</sup> /с	25,0	30,0	60,0
Температура вспышки в закрытом тигле, С°	220	225	218
Щелочное число, мг КОН/г	16	248	405
Содержание кальция, % масс.	2,4	10,0	15,0
Содержание сульфатной золы, % масс.	8,0	33,8	50,5

Для изучения антикоррозионных свойств сульфонатных присадок были приготовлены ингибирующие составы, представляющие их 5%-ные растворы в базовом масле НС-4, получаемые путем депарафинизации остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей [6].

Защитные свойства объектов исследований оценивали по ГОСТ 9.054<sup>1</sup> на стальных пластинках в электролите (метод 4), климатической камере (метод 1) и камере солевого тумана (метод 3). Элементный состав использованных в работе стальных пластинок, определенный методом оптико-эмиссионной спектроскопии (СПЕКТРОПОРТ), следующий, % масс.: железо – 99,1; углерод – 0,156; сера – 0,0242; никель – 0,011; алюминий – 0,004; кобальт – 0,0102; медь – 0,0091; титан – 0,0022; прочие примеси – 0,6833.

Критерием оценки защитных свойств служила потеря массы стальных пластинок после удаления продуктов коррозии.

Сущность метода испытания при постоянном погружении в электролит заключается в выдерживании исходной стальной пластинки и пластинок с нанесенными на них ингибирующими составами в растворе электролита, содержащем в своем составе карбонат натрия, хлориды кальция и магния, хлористый и серноокислый натрий согласно ГОСТ 9.054<sup>1</sup>, метод 4.

Испытания в климатической камере проводились циклами, состоящими из двух частей: вначале образцы подвергались воздействию воздушной среды с температурой (40±2) °С и относительной влажностью воздуха 95–100% в течение 7 ч; затем создавались условия конденсации влаги на образцах путем выключения нагрева камеры. Продолжительность второй части цикла составляла 17 ч.

Испытания в камере солевого тумана состояли в выдерживании стальных пластинок, покрытых приготовленными ингибирующими составами, в атмосфере соляного тумана (распыленный 5%-ный раствор хлорида натрия) при температуре (35±2) °С.

Продукты коррозии удалялись с поверхности пластинок в соответствии с ГОСТ Р 9.907<sup>2</sup>.

Результаты оценки защитной эффективности 5%-ных растворов сульфонатных присадок НССК-30, С-150 и ССК-400 в базовом масле НС-4 в условиях воздействия электролита, влажной воздушной среды и солевого тумана представлены на рисунке 2.

<sup>1</sup> ГОСТ 9.054-75. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности. – М: Изд-во стандартов, 1975. – 11 с.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 9.907-2007. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. – М: Стандартинформ, 2007. – 19 с.

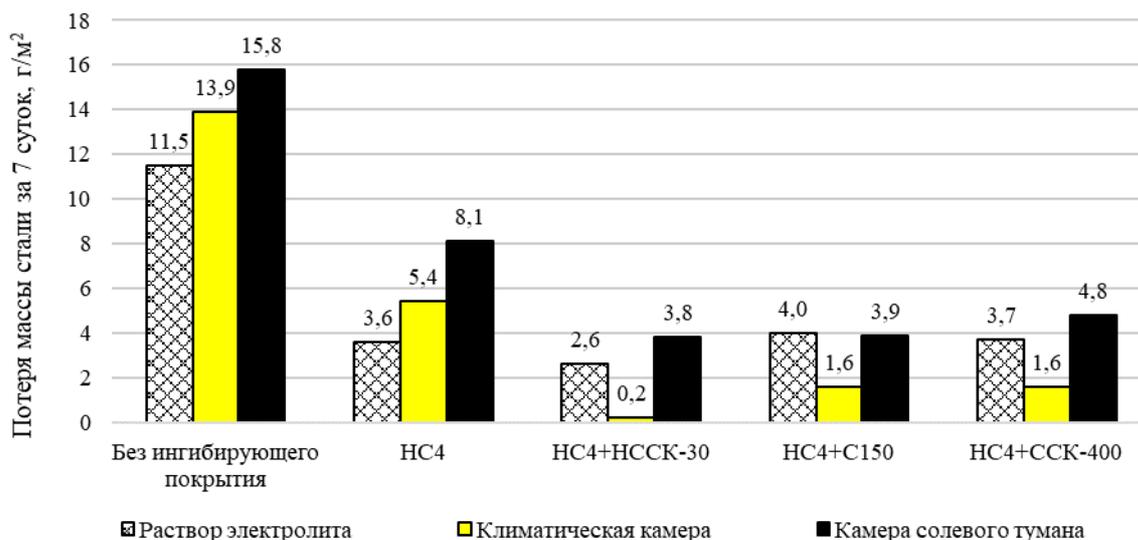


Рисунок 2. – Защитные свойства 5%-ных растворов сульфонатных присадок в базовом масле

Полученные результаты соответствуют литературным данным [3; 4] и свидетельствуют о различии защитных свойств ингибирующих составов и неодинаковом характере протекания коррозионного процесса для разных методов испытаний.

Для пластинки, не покрытой ингибирующим составом, после пребывания в растворе электролита наблюдается максимальная потеря массы. Базовые масла создают определенный защитный слой на поверхности металла, который, однако, обладает высокой проницаемостью для кислорода воздуха, что интенсифицирует развитие коррозии (потеря массы в два раза ниже, чем для необработанной пластинки).

При испытании в климатической камере, по сравнению с экспериментом в электролите, наблюдается более интенсивное развитие коррозионного процесса для не обработанной ингибирующим составом и обработанной чистым базовым маслом пластинки, и менее интенсивное протекание коррозионного процесса для пластинок, обработанных растворами сульфонатных присадок в базовом масле. В первом случае это связано с тем, что при переходе от коррозии в объеме электролита к коррозии под пленкой влаги облегчается доступ кислорода к поверхности железа, в результате чего уменьшается катодная поляризация и увеличивается скорость коррозии металла. Во втором – коррозия пластинок во многом определяется защитными свойствами присадок. Сульфонаты двухвалентных металлов образуют, как правило, прочные хемосорбционные защитные пленки. Поэтому они обладают высокой эффективностью при испытании в климатической камере. Однако ингибиторы этого типа малоэффективны на начальных стадиях торможения коррозии в системе масло+вода+металл: незначительно изменяют межфазное натяжение на границе масло-вода, практически не тормозят электрохимические процессы коррозии и, таким образом, плохо вытесняют электролит с поверхности металла [4].

При испытании в камере солевого тумана наблюдается еще более интенсивное развитие коррозионного процесса, чем в предыдущих методах, т.к. присутствие хлорида натрия вызывает еще большее увеличение скорости коррозии стальной пластинки [7].

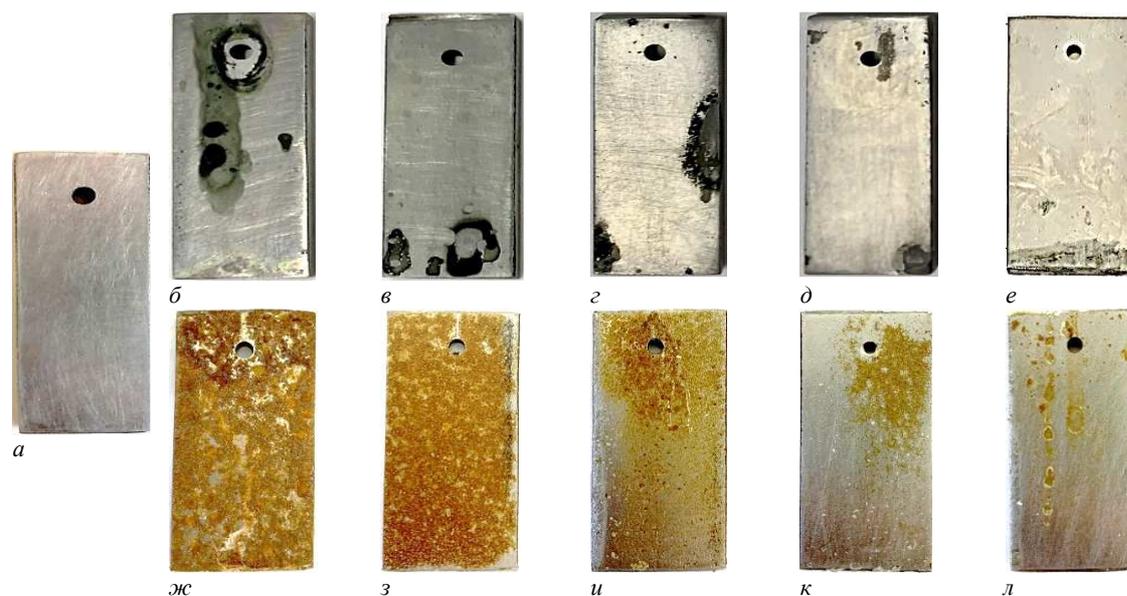
Можно заметить, что во всех испытаниях введение сульфонатных присадок в базовое масло приводит к улучшению защитных свойств последнего, при этом наблюдается следующая закономерность: чем ниже щелочное число сульфонатной присадки, тем выше защитные свойства ингибирующего состава на ее основе.

Фотографии поверхности стальных пластинок до и после проведения испытаний представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что состояние поверхности стальных пластинок коррелирует с результатами анализа изменения их массы в ходе испытаний. Для пластинок, покрытых ингибирующими составами, наименьшее количество коррозионных очагов наблюдается на поверхности пластинок, покрытых раствором НС-4+НССК-30, наибольшее – пластинок, покрытых раствором НС-4+ССК-400.

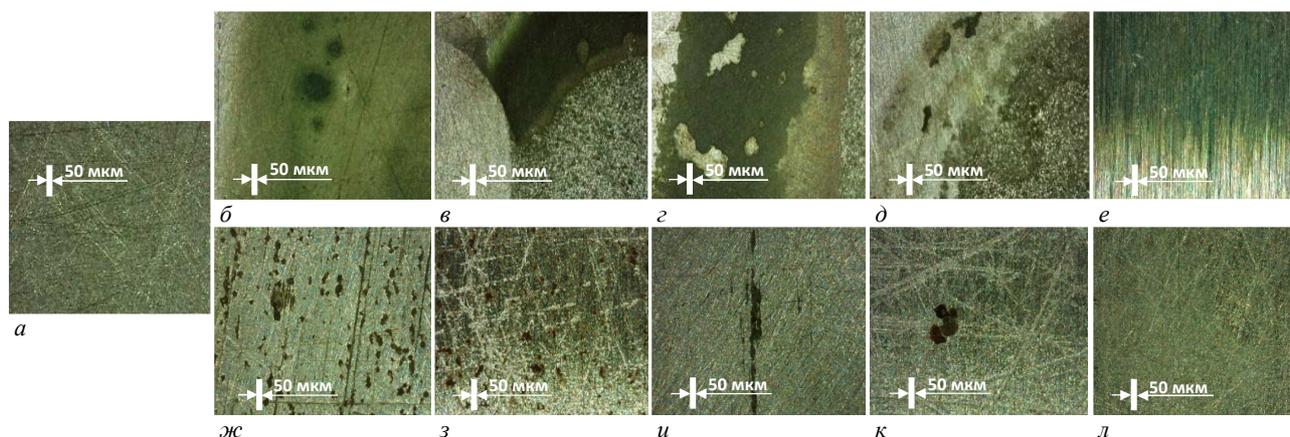
Для выявления характера коррозионных разрушений стальных пластинок под действием электролита и климатических факторов методом оптической микроскопии был проведен анализ состояния поверхности пластинок (рисунок 4).

При проведении всех испытаний на пластинках (рисунки 3 и 4) развивалась местная (локальная) коррозия, которая характеризуется тем, что охватывает отдельные участки поверхности металла, а остальная часть поверхности остается незатронутой.



*а* – исходная; *б-е* – после испытаний в растворе электролита; *ж-л* – в солевом тумане; *б, ж* – не обработанная ингибирующим составом; *в, з* – обработанная маслом NS-4; *г, и* – обработанная раствором NS-4+ССК-400; *д, к* – обработанная раствором NS-4+C-150; *е, л* – обработанная раствором NS-4+HССК-30

Рисунок 3. – Фотографии стальных пластинок до и после испытаний



*а* – исходная; *б-е* – после испытаний в растворе электролита; *ж-л* – в климатической камере; *б, ж* – не обработанная ингибирующим составом; *в, з* – обработанная маслом NS-4; *г, и* – обработанная раствором NS-4+ССК-400; *д, к* – обработанная раствором NS-4+C-150; *е, л* – обработанная раствором NS-4+HССК-30

Рисунок 4. – Фотографии под микроскопом стальных пластинок до и после испытаний

Анализируя рисунок 4, можно сделать вывод, что на пластинках, испытанных в электролите и климатической камере, местная коррозия развивалась пятнами или язвами (основное различие между видами состоит в глубине коррозионного разрушения, которое в данном исследовании не оценивалось). При микроскопическом анализе пятен или язв можно видеть, что большинство из них образовано множеством отдельных точек, так называемых питтингов. Особенно интенсивно питтинговая коррозия развивалась на поверхности стальных пластинок, испытанных в растворе электролита, т.к. практически обязательным условием развития этого вида коррозии является воздействие хлоридов, которые в значительном количестве присутствовали в составе электролита.

**Заключение.** В результате проведенных исследований были выявлены закономерности изменения защитных свойств синтетических сульфонатных присадок в зависимости от величины их щелочного числа. Проведена качественная и количественная оценка эффективности использования сульфонатных присадок в смеси с гидрокрекингвым базовым маслом NS4 в качестве ингибирующих составов для защиты стали от коррозии. Показано, что эффективность защитного действия ингибирующих составов возрастает с уменьшением щелочного числа сульфонатной присадки. Выявлено образование питтингов на поверхности стальных пла-

стинок в процессе их коррозионного разрушения. Особенно интенсивно питтинговая коррозия развивалась на поверхности стальных пластинок, испытанных в растворе электролита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Производство присадок и пакетов присадок к моторным маслам: учеб.-метод. комплекс / С.В. Покровская, И.В. Бурая, Ю.А. Булавка и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2013. – 94 с.
2. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. – М.: Химия, 1984. – 248 с.
3. Шехтер Ю.Н. Защита металлов от коррозии (ингибиторы, масла и смазки). – М.: Химия, 1964. – 120 с.
4. Братков А.А., Шимонаев Г.С., Горенков А.Ф. Теоретические основы химмотологии. – М.: Химия, 1985. – 315 с.
5. Шехтер Ю.Н., Крейн С.Э., Тетерина Л.Н. Маслорастворимые поверхностно-активные вещества. – М.: Химия, 1978. – 304 с.
6. Ермак, А.А. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» / А.А. Ермак, С.В. Покровская, И.В. Бурая [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2015. – № 11. – С. 115–120.
7. Защита металлов от коррозии: курс лекций для студентов специальности 1-36 0701 «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов» / сост. А.И. Гарост. – Минск: БГТУ, 2018. – 122 с.

## REFERENCES

1. Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Bulavka, Yu.A., Babushkin, M.O. & Zavadskii, A.V. (2013). *Proizvodstvo prisadok i paketov prisadok k motornym maslam*. Novopolotsk: Polotskii Gosudarstvennyi Universitet. (In Russ.)
2. Bogdanova, T.I. & Shekhter, Yu.N. (1984). *Ingibirovannye neftyanye sostavy dlya zashchity ot korrozii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
3. Shekhter, Yu.N. (1964). *Zashchita metallov ot korrozii (ingibitory, masla i smazki)*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
4. Bratkov, A.A., Shimonaev, G.S. & Gorenkov, A.F. (1985). *Teoreticheskie osnovy khimotologii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
5. Shekhter, Yu.N., Krein, S.E. & Teterina, L.N. (1978). *Maslorastvorimye poverkhnostno-aktivnye veshchestva*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
6. Ermak, A.A., Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Syubareva, E.V. & Zavadskii, A.V. (2015). Svoistva i perspektivnye napravleniya pererabotki ostatocnogo produkta protsesssa «Yunikreking» [The Properties and Promising Areas of Processing Residual Product of the Process “Unicracking”]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 115–120. (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Garost, A.I. (Ed.). (2018). *Zashchita metallov ot korrozii*. Minsk: BG TU. (In Russ.)

Поступила 18.12.2023

## ANTICORROSIVE PROPERTIES OF SULFONATE ADDITIVES

G. ANNAYEV, A. YERMAK, N. SOVETNIKOV  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

B. MAMMEDOV  
(Yagshygeldi Kakaev International University of Oil and Gas, Ashgabat)

The article is devoted to the study of the anticorrosive properties of sulfonate additives mixed with HC4 hydrocracking base oil. The results of a study of the anticorrosive effectiveness of sulfonate additives NSSK-30, S-150, SSK-400 are presented. The patterns of changes in the protective properties of synthetic sulfonate additives depending on the value of their alkaline number have been revealed. A qualitative and quantitative assessment of the effectiveness of using sulfonate additives in a mixture with HC4 base oil as inhibitory compounds to protect steel from corrosion under the action of an electrolyte, in a climatic chamber and a salt mist chamber was carried out. It has been shown that the effectiveness of the protective action of inhibitory compounds increases with a decrease in the alkaline number of the sulfonate additive. The nature of the change in the surface of steel plates in the process of their corrosion destruction, accompanied by the formation of pitting, is revealed.

**Keywords:** sulfonate additives, corrosion inhibitors, anticorrosive efficiency, climate chamber, salt mist chamber, pitting corrosion.

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СОРБЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЕМ АКТИВАЦИИ НЕФТЯНОГО КОКСА ФОСФОГИПСОМ

Д.С. ЮХНО

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2610-9832>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены основные сравнительные характеристики сорбентов, полученных путем химической активации нефтяного кокса фосфогипсом, в т.ч. с применением полимерного вяжущего материала. Проанализированы свойства сорбентов на основе активированного фосфогипсом нефтяного кокса для очистки технической воды. Предложены схема получения сорбентов на основе активированного фосфогипсом нефтяного кокса с полимерным связующим, а также схема использования дробленого кокса при очистке промышленных стоков НПЗ от нефти и механических примесей.

**Ключевые слова:** нефтяной кокс, кокс, фосфогипс, полимерный вяжущий материал, активация, сорбент, вода, очистка, промышленные стоки, НПЗ, нефть, механические примеси.

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является поиск путей рационального использования сернистого нефтяного кокса и получение из него продуктов с высокой добавленной стоимостью. Одними из таких продуктов могут быть сорбенты. Так, известно, что нефтяной кокс может использоваться для получения углеродных сорбентов методом парогазовой активации<sup>1,2,3</sup> либо методом химической активации<sup>4</sup> [1–3].

Процесс получения активированных углей химической активацией из нефтяного кокса сводится к частичной декарбонизации с выделением оксидов углерода. В качестве активирующих агентов могут применяться различные кислоты, щелочи и соли<sup>4</sup>, способные вступать в окислительно-восстановительные реакции с углеродом кокса.

В связи с этим предполагается, что в качестве активаторов сорбентов на основе нефтяного кокса потенциально возможно использовать отходы производства минеральных удобрений, например, фосфогипс. При взаимодействии фосфогипса с углеродом кокса при температуре 900 °С происходит образование сульфида кальция и CO<sub>2</sub> [4].

*Цель проведенных исследований* – определение возможности получения сорбентов путем активации кокса фосфогипсом и оценка эффективности использования его при очистке воды.

**Исследовательская часть.** Исходный дробленый нефтяной кокс (с размером частиц от 1,25 до 0,05 мм) и его смесь с фосфогипсом (размер частиц менее 0,05 мм) в количестве 10% масс. подвергались термической обработке в течение 2 ч в закрытом тигле, помещенном в муфельную печь, при (900±5) °С. Затем для полученных образцов определяли адсорбционные характеристики при помощи порометра BELSORP MAX (Япония). Свойства использованного в работе фосфогипса представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Свойства фосфогипса

Наименование показателя	Значение
Водородный показатель (рН) 10 % водного раствора	4,73
Массовая доля общих фосфатов на сухое вещество, % масс.	1,03
Массовая доля водорастворимых фосфатов на сухое вещество, % масс.	0,13
Массовая доля общего фтора на сухое вещество, % масс.	0,32
Массовая доля водорастворимого фтора на сухое вещество, % масс.	0,020
Массовая доля сульфата кальция на сухое вещество, % масс.	98,16
Массовая доля кальция СаО на сухое вещество, % масс.	40,01
Массовая доля сульфатной серы (SO <sub>4</sub> ), % масс.	58,15
Массовая доля общей воды (сушка при (400±1)°С), % масс.	36,22
Насыпная плотность (сушка при (160±1)°С), кг/м <sup>3</sup>	848,7

<sup>1</sup> Юхно Д.С., Ермак А.А. Комплексная переработка высокосернистого нефтяного кокса // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: материалы V Всерос. науч. конф. / Иваново (30 июня – 2 июля 2021 г.). – Иваново: ФГБОУ ВО, 2021. – С. 198–201.

<sup>2</sup> Тагиров М.А. Технология получения активированного углеродного материала на основе нефтяного кокса: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2014. – 110 л.

<sup>3</sup> Способ определения времени активации поверхности нефтяного кокса: пат. RU 2011120526 / М.А. Тагиров, Б.С. Жирнов, В.А. Будник, Е.В. Гостьков. – Оpubл. 27.12.2012.

<sup>4</sup> Баширов И.И. Получение формованного углеродного адсорбента из нефтяного сырья методами паровой и щелочной активации: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2016. – 121 л.

В качестве адсорбтива использовался  $\text{CO}_2$  при температуре 298 К. Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) исследуемых образцов до и после термообработки представлены на рисунке 1.

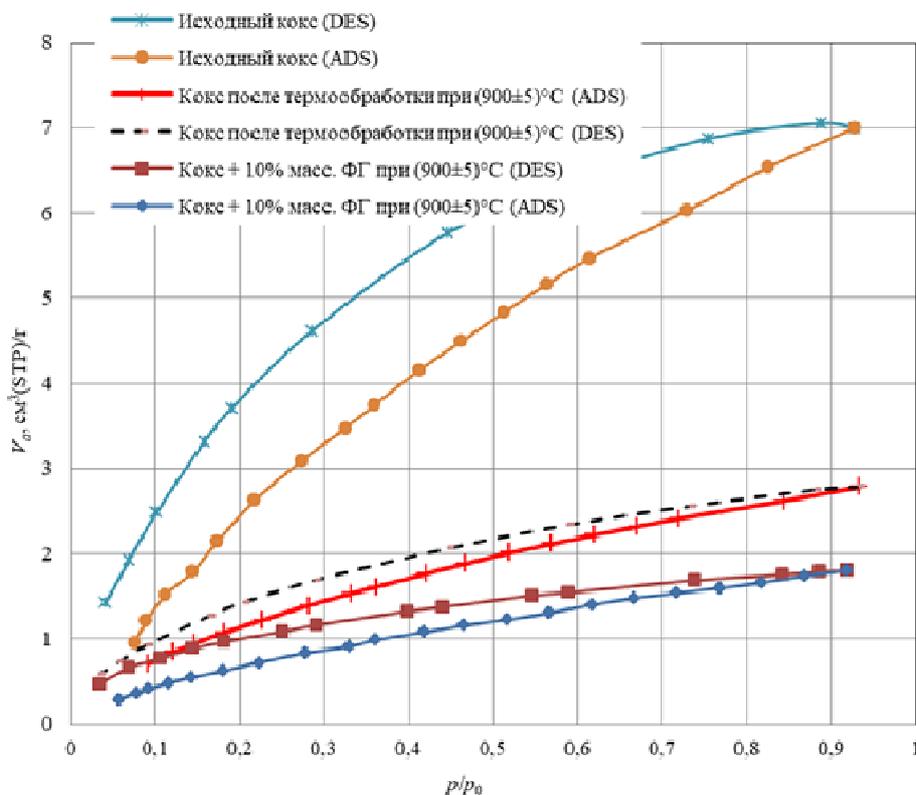


Рисунок 1. – Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) образцов исходного дробленого кокса до и после термообработки с добавлением фосфогипса (ФГ)

Из рисунка 1 видно, что присутствие фосфогипса при термообработке кокса приводит к уменьшению объема адсорбированного  $\text{CO}_2$  на 1 г исследуемого образца. При этом резко снижается удельная площадь поверхности и суммарный объем пор образца кокса (таблица 2).

Таблица 2. – Характеристики поверхности образцов дробленого нефтяного кокса с и без добавления фосфогипса

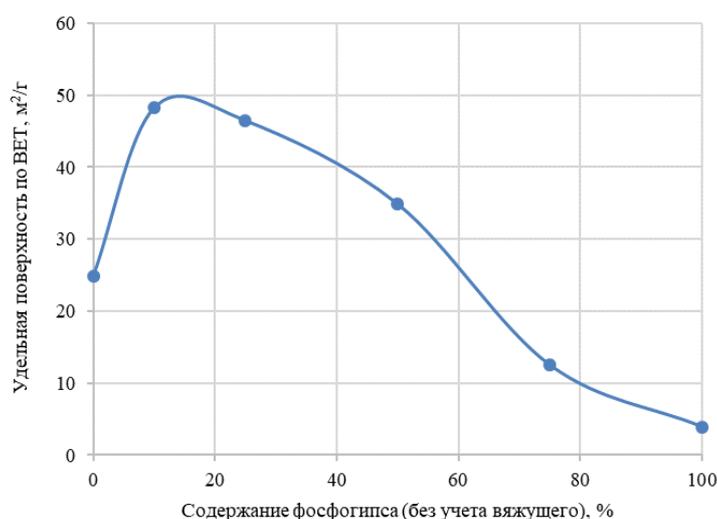
Показатель	Значение для образцов		
	Исходный кокс	После термообработки 2 ч при $(900\pm 5)$ °C	
		кокс	кокс + 10% масс. ФГ
Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ, $\text{м}^2/\text{г}$	17,715	6,4927	4,1145
Суммарный объем пор по методу ВЕТ, $\text{мм}^3/\text{г}$	19,274	7,6654	4,959
Средний диаметр пор по методу ВЕТ, нм	4,3520	4,7224	4,8211
Константа С в уравнении ВЕТ	6,0265	15,586	11,285
Удельная площадь поверхности по методу Ленгмюра, $\text{м}^2/\text{г}$	84,533	24,282	16,53
Константа адсорбционного равновесия – отношение констант скорости адсорбции/десорбции	0,0098	0,0187	0,0161
Потенциальная энергия адсорбции по методу ДА (метод Дубинина–Астахова), Дж/моль	3,1974	4,1742	3,8042
Потеря массы при термообработке, % масс.	–	12,4	22,96

Средний диаметр пор, определенный по методу ВЕТ, при термообработке образцов в присутствии фосфогипса снижается. При этом уменьшаются потенциальная энергия адсорбции  $\text{CO}_2$ , рассчитанная по методу Дубинина–Астахова, и коэффициент С в уравнении ВЕТ, т.е. отношение констант адсорбционного равновесия адсорбата в первом слое и его константы конденсации.

Снижение удельной поверхности образцов дробленого кокса в присутствии порошкообразного фосфогипса можно объяснить закупоркой пор, содержащихся в коксе, продуктами взаимодействия компонентов фосфогипса с коксом, например, сульфидом кальция.

Для более тесного контакта нефтяного кокса с фосфогипсом при совместной термообработке их необходимо измельчить и подвергнуть прессованию. Однако, как показали исследования, при прессовании измельченного кокса (фракция менее 0,05 мм) с просушенным при  $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$  фосфогипсом под давлением в 4 МПа при помощи лабораторного гидравлического пресса получают хрупкие образцы, легко разрушающиеся при незначительном механическом воздействии. В связи с этим при формировании образцов в качестве вяжущего материала были использованы бытовые полимерные отходы.

Формование образцов проводилось следующим образом. Навески образца кокса, фосфогипса и вяжущего (в количестве 30% масс. на образец) смешивались при температуре  $270\text{--}300^\circ\text{C}$  до однородного состояния и прессовались в горячем состоянии при помощи лабораторного гидравлического пресса не менее 5 мин при давлении 4 МПа. В результате были получены образцы в виде таблеток диаметром 50 мм и толщиной около 3–5 мм. Затем приготовленные образцы подвергались термообработке в муфельной печи при  $(600 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. После этого их измельчили и исследовали при помощи порометра BELSORP MAX. В качестве адсорбтива использовался  $\text{CO}_2$  при температуре 298 К. В процессе термообработки у всех образцов с полимерным вяжущим материалом увеличивается объем пор и удельная поверхность. При этом зависимость изменения удельной поверхности образцов от увеличения содержания в них фосфогипса носила экстремальный характер (рисунок 2).

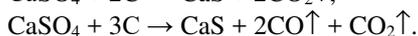
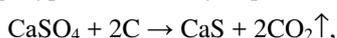


**Рисунок 2. – Влияние содержания фосфогипса на удельную поверхность образцов после термообработки**

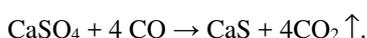
Добавка фосфогипса к нефтяному коксу в количестве от 10 до 25% масс. позволяет при термообработке увеличить удельную поверхность образца примерно в 2 раза. Потеря массы образцов при термообработке составила от 31 до 35% масс., т.е. превышает содержание вяжущего в смеси. С учетом того, что образцы после термообработки самопроизвольно не разрушаются, значит, термическому разложению подвергается не только полимерное вяжущее, но и кокс. Вероятно, за счет взаимодействия с продуктами термодеструкции вяжущего.

Изучение процесса очистки воды с использованием активированного фосфогипсом нефтяного кокса без какой-либо дополнительной обработки показало, что в активированном таким способом коксе содержатся водорастворимые соли, которые, переходя в воду, ухудшают ее качество. Сразу после пропускания воды через слой адсорбента фильтрат прозрачный. Однако примерно через сутки он приобретает светло-желтый оттенок и характерный запах сероводорода. При этом раствор становится слабощелочным.

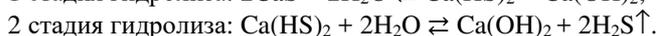
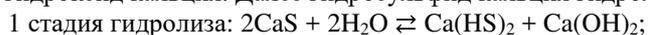
Полученные результаты можно объяснить переходом в фильтрат солей, образующихся в процессе активации кокса фосфогипсом, с последующим их гидролизом. Например, при активации кокса фосфогипсом при температуре  $900^\circ\text{C}$  могут протекать следующие реакции:



С монооксидом углерода сульфат кальция реагирует при температуре  $600\text{--}800^\circ\text{C}$  по реакции



Сульфид кальция ( $\text{CaS}$ ) малорастворим в воде. При температуре  $0^\circ\text{C}$  он образует в воде насыщенный раствор с концентрацией 0,13% масс. и медленно гидролизует [5]. На первой стадии образуется гидросульфид и гидроксид кальция. Далее гидросульфид кальция гидролизует до гидроксида кальция и сероводорода:



В результате гидролиза образуются гидроксид-ионы (ОН<sup>-</sup>), поэтому раствор приобретает щелочную среду с pH > 7. С повышением температуры растворимость сульфида кальция в воде увеличивается.

В связи с вышесказанным для удаления водорастворимых солей из активированного фосфогипсом кокса был использован следующий метод. Образец активированного фосфогипсом кокса заливали 1% масс. раствором HCl и кипятили в течение 1 ч. Затем раствор сливали и промывали образец 10-кратным объемом дистиллированной воды до нейтральной реакции. Промытый образец сушили при температуре (105±1) °С в течение 1 ч. О полноте удаления водорастворимых веществ судили по изменению содержания солей в суспензии полученного образца в дистиллированной воде при помощи TDS-метра ИК-01. После промывки удельная поверхность активированного 10% масс. фосфогипса кокса увеличилась на 17 м<sup>2</sup>/г.

Исследования показали, что формованный измельченный кокс, активированный фосфогипсом, после удаления водорастворимых солей может быть использован в качестве адсорбента при очистке технической воды, загрязненной нефтью и нефтепродуктами.

Так, при пропускании 1% об. эмульсии нефти в воде через образцы активированного дробленого кокса и кокса, активированного фосфогипсом, содержание солей в фильтратах при увеличении кратности воды с нефтью к активированному коксу вначале снижается, а затем стабилизируется на уровне, близком к исходному содержанию солей в воде (рисунок 3). Мутность фильтратов также вначале снижается, а затем увеличивается (рисунок 4). Мутность фильтратов определялась в единицах NTU (nephelometric turbidity units) согласно ГОСТ ISO 7027 при помощи мутномера LOVIBOND TB 300 IR.

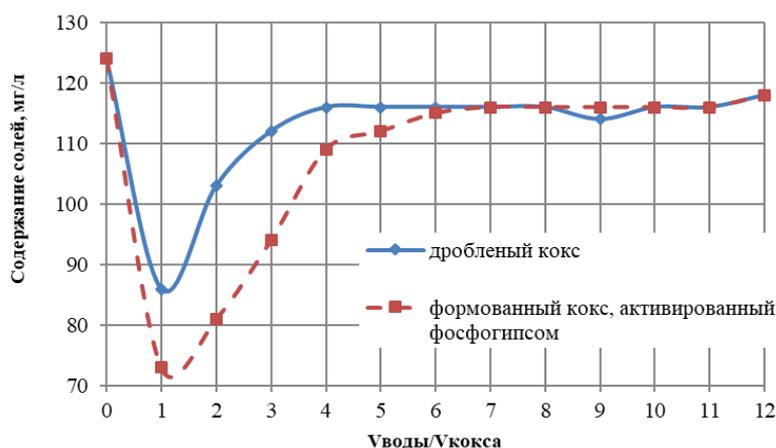


Рисунок 3. – Изменение содержания солей (TDS) в воде с увеличением объемной кратности воды с нефтью, пропущенной через образцы активированного кокса



Рисунок 4. – Изменение мутности очищенной воды в единицах NTU с увеличением объемной кратности воды с нефтью, пропущенной через образцы активированного кокса

Установлено, что активированный фосфогипсом нефтяной кокс является более эффективным адсорбентом при очистке воды, чем активированный дробленый кокс. Принципиальная блок-схема получения адсорбента

та на основе измельченного нефтяного кокса, активированного фосфогипсом и формованного при помощи полимерных отходов, представлена на рисунке 5.

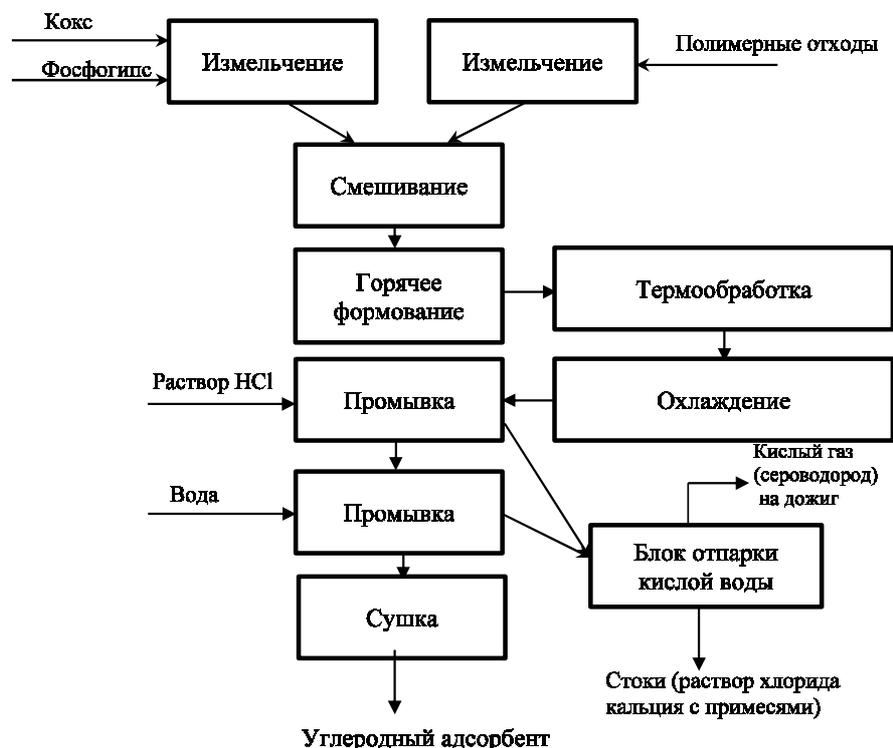


Рисунок 5. – Принципиальная блок-схема получения адсорбента на основе измельченного нефтяного кокса, активированного фосфогипсом и формованного полимерным вяжущим материалом

**Заключение.** Фосфогипс при его совместной термообработке с нефтяным коксом является достаточно результативным активирующим агентом, эффективность действия которого зависит от степени контакта компонентов, содержания фосфогипса в смеси и условий проведения термообработки. Полученный сорбент может быть использован для очистки воды, однако, для удаления образующегося при активации сульфида кальция и других водорастворимых солей необходимы его промывка раствором соляной кислоты, водой и сушка. Дробленый нефтяной кокс и формованный с использованием полимерного вяжущего кокс, активированный фосфогипсом, в процессе их совместной термообработки после удаления водорастворимых солей могут быть использованы при очистке промышленных стоков НПЗ от нефти и механических примесей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кугатов П.В., Кусалиев А.В., Жирнов Б.С. Получение углеродного адсорбента на основе сырого нефтяного кокса путем совместной карбонизации с гидроксидом калия // *Кокс и химия*. – 2019. – № 1. – С. 23–28.
2. Кугатов П.В., Жирнов Б.С. Формованный углеродный адсорбент на основе активированного гидроксидом калия нефтяного кокса // *Химия и технология топлив и масел*. – 2020. – № 3. – С. 22–25.
3. Исследование возможности переработки нефтяного кокса с повышенным содержанием летучих веществ в углеродные сорбенты / Е.А. Фарберова, А.С. Максимов, А.С. Ширкунов и др. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 92–99.
4. Сусликов А.В., Жирнов Б.С., Муртазин Ф.Р. Исследование кинетических закономерностей взаимодействия нефтяного кокса с фосфогипсом до сульфида кальция // *Химия и технология топлив и масел*. – 2021. – № 3. – С. 32–35.
5. Неорганическая химия: в 3 т. / под ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: Академия. – Т. 2: Химия переходных элементов: учеб. / А.А. Дроздов, В.П. Зломанов, Г.Н. Мазо и др. – 2004. – 368 с.

#### REFERENCES

1. Kugatov, P.V., Kusaliev, A.V. & Zhirnov, B.S. (2019). Poluchenie uglerodnogo adsorbenta na osnove syrogo neftyanogo koksa putem sovmestnoi karbonizatsii s gidroksidom kaliya [Preparation of a carbon adsorbent based on raw petroleum coke by joint carbonization with potassium hydroxide]. *Koks i khimiya [Coke and chemistry]*, (1), 23–28. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Kugatov, P.V. & Zhirnov, B.S. (2020). Formovannyi uglerodnyi adsorbent na osnove aktivirovannogo gidroksidom kaliya neftya-nogo koksa [Molded carbon adsorbent based on petroleum coke activated by potassium hydroxide]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and technology of fuels and oils]*, (3), 22–25. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Farberova, E.A., Maksimov, A.S., Shirkunov, A.S., Ryabov, V.G., Tingaeva, E.A. & Strelkov, V.A. (2021). Issledovanie vozmozhnosti pererabotki nefryanogo koksa s povyshennym sodержaniem letuchikh veshchestv v uglerodnye sorbenty [Investigation of the possibility of processing petroleum coke with an increased content of volatile substances into carbon sorbents]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [ChemChemTech]*, 64(4), 92–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6331 (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Suslikov, A.V., Zhirnov, B.S. & Murtazin, F.R. (2021). Issledovanie kineticheskikh zakonomernostei vzaimodeistviya nefryanogo koksa s fosfogipsom do sul'fida kal'tsiya [Study of the kinetic patterns of the interaction of petroleum coke with phosphogypsum to calcium sulfide]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and Technology of Fuels and Oils]*, (3), 32–35. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Drozdov, A.A., Zlomanov, V.P., Mazo, G.N. & Spiridonov, F.M. (2004). Т. 2: *Khimiya pere-khodnykh elementov*. In Yu.D. Tretyakova (Eds.) *Neorganicheskaya khimiya: v 3 t*. Moscow: Akademiya. (In Russ.)

Поступила 30.11.2024

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF A SORBENT OBTAINED BY ACTIVATING PETROLEUM COKE WITH PHOSPHOGYPSUM

**D. YUKHNO, A. YERMAK**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article presents major comparative characteristics of sorbents obtained by chemical activation of petroleum coke with phosphogypsum, including the use of polymer binder. The study of sorbents based on phosphogypsum-activated petroleum coke for industrial effluent treatment is presented. The article also proposes the flowchart for sorbents production on the basis of phosphogypsum-activated petroleum coke with polymer binder, as well as the flowchart for using crushed coke for refinery industrial effluent treatment from petroleum and mechanical impurities.*

**Keywords:** *petroleum coke, coke, phosphogypsum, polymer binder, activation, sorbent, water, treatment, industrial effluent, refinery, petroleum, mechanical impurities.*

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН**

**С.М. АЗАРОВ<sup>2</sup>, Е.Е. ПЕТЮШИК<sup>1</sup>, И.В. ФОМИХИНА<sup>1</sup>, А.А. ДРОБЫШ<sup>2</sup>,  
Т.Е. ЕВТУХОВА<sup>2</sup>, Е.И. МИХАСИК<sup>2</sup>, О.М. СТЕПАНОВА<sup>2</sup>, И.В. САКСОНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>(Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск)

<sup>2</sup>(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты исследований характеристик пористых материалов на основе базальтового волокна, полученных радиальным прессованием с последующим спеканием на воздухе. На основании анализа изображений структур показано, что материал характеризуется высокой пористостью. Образование пор между волокнами базальта происходит путем выгорания органической и полимерной связей. Установлено, что спекание базальтового волокна при 1050 °С и 1100 °С формирует пористый материал со структурой, характеризующейся пористостью 52–75%, средним размером пор 8–18 мкм, коэффициентом проницаемости (42–55)  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>, прочностью на сжатие 7–13 МПа. Полученные результаты доказывают, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по сравнению с аналогами.

**Ключевые слова:** базальт, волокно, свойства материала, структура, фазовый состав.

**Введение.** Интерес к использованию базальтового волокна для получения пористой керамики основан на возможности формирования волокнистой матрицы, обладающей не только высокой проницаемостью, но и достаточной технологической прочностью. Применение пористых материалов на основе керамических волокон в качестве фильтрующих материалов при очистке жидкостей и газов в системах каталитического крекинга, очистке выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания определяется возможностями эксплуатации при высоких (свыше 15 МПа) давлениях, температурах (до 700 °С) с сохранением прочности в режиме длительной эксплуатации. В отличие от известных тканых материалов (волоконные базальтовые плиты) размер и конфигурация пор создаваемых пористых материалов остаются постоянными в процессе эксплуатации за счет жесткости каркаса. Такое техническое решение позволяет повысить стабильность фильтрующих характеристик, качество очистки и кардинально уменьшить габариты устройств с одновременным снижением расходов на регенерацию за счет замены фильтрующих материалов, работающих в режиме объемной фильтрации, на фильтроэлементы, у которых удаляемые загрязнения собираются на поверхности фильтрующей перегородки. В этом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор, а затем из них образуется слой загрязнений, который также является фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для жесткой пористой перегородки толщиной 1...20 мм с размерами пор 1...20 мкм (режим микрофильтрации), организованной в виде пластин или труб различного диаметра (фильтроэлементы), которые работают при малых скоростях фильтрования. Если при работе зернистых загрузок скорости фильтрования обычно составляют 10...25 м/ч, то скорости фильтрования в режиме микрофильтрации не должны превышать 5 м/ч. Накапливающиеся на фильтрующей поверхности загрязнения периодически удаляются в дренаж методом обратной промывки отфильтрованной водой.

Базальты по содержанию кремнезема и глинозема наиболее близки к Е-стеклу, из которого производят лучшие стеклянные нити. Но температурный интервал применения базальтовых волокон составляет от -40 °С до +700–900 °С, а стеклянных – от -60 °С до +450 °С<sup>1</sup>. В зависимости от температуры и времени нагрева в базальте существенно изменяется содержание оксида железа. Переход FeO в Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> происходит при температуре выше 600 °С. Гигроскопичность базальтовых волокон не превышает 1%, стеклянных – 10–20%. В целом базальтовые волокна превосходят стеклянные по термическим, физическим, электрическим и акустическим характеристикам, а также по химической стойкости.

В то же время при обработке давлением пакетов базальтовых волокон (длина превышает поперечные размеры на 2–3 порядка) проявляется жестко-гибкий характер их деформирования. Наличие нескольких контактных узлов для каждого волокна затрудняет их относительное смещение. Защемление в контактных узлах приводит к деформации в области контактных узлов. Кроме увеличения контактных площадок за счет изгиба волокон образуется их взаимное механическое зацепление. Традиционно возможность изготовления пористых материалов на основе волокон реализовано лишь для пластичных материалов, таких как металлические или полимерные волокна. В работе [1] показано, что при радиальном прессовании дисперсная среда изменяет свою плотность лишь в результате структурной переукладки частиц, которая происходит достаточно

<sup>1</sup> Свойства базальтового волокна [Электронный ресурс]. – URL: <http://novitsky1.narod.ru/basalt5.htm> (дата обращения: 29.12.2022)

равномерно во всем объеме прессуемого тела. Благодаря этому удается сформировать технологически прочное изделие из частиц с низким ресурсом пластичности. Эта особенность радиального прессования позволяет получать длинномерные пористые трубы (основы фильтрующих элементов) с отношением длины к диаметру более 35.

*Цель данной работы* – исследование влияния режимов радиального прессования и температуры спекания на характеристики пористых материалов из базальтовых волокон.

**Материал и методики исследований.** В диапазоне давлений 20–50 МПа из шихты на основе базальтового волокна марки БС16-6-76 способом радиального прессования были сформованы заготовки в форме труб с размерами:  $\varnothing 19$  мм, длина – 100 мм, и образцы в виде цилиндров  $\varnothing 19$  мм и высотой 10 мм с последующим спеканием на воздухе в диапазоне температур 1050–1150 °С. Давление прессования – 45 МПа.

Характеристики полученных опытных образцов определяли по стандартным методикам, принятым в порошковой металлургии и материаловедении.

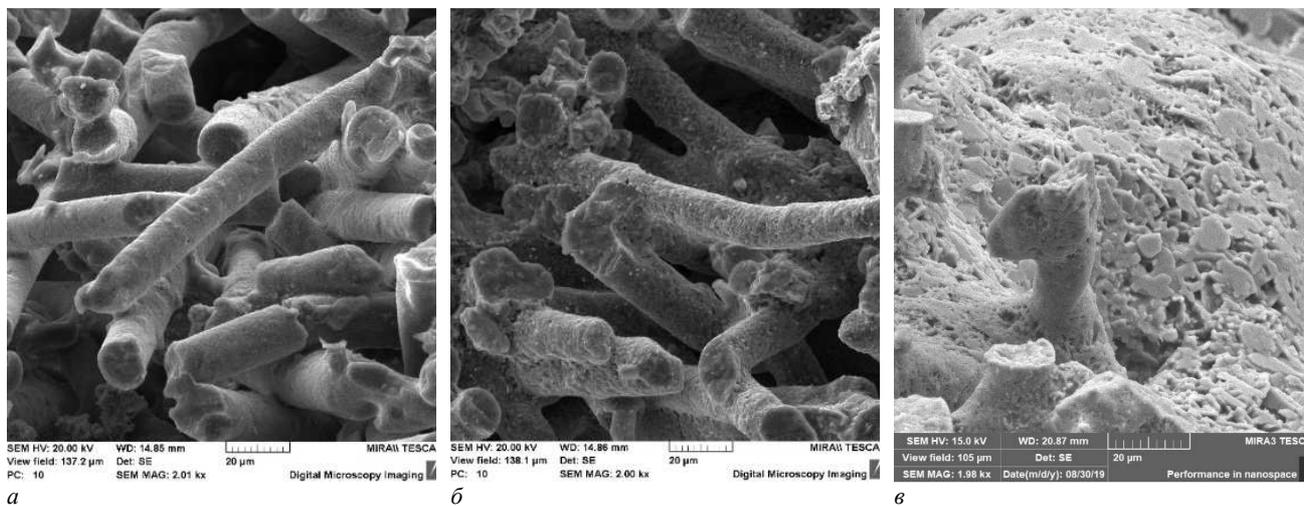
Метод испытания на сжатие заключался в определении максимальной нагрузки, предшествующей разрушению образца. Образец для испытания помещали между нажимными плитами испытательной машины таким образом, чтобы он находился в центре плит. Нагружение образца проводили плавно и непрерывно. Прочность при сжатии образца (максимальное напряжение, возникающее в момент разрушения), МПа, вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{S},$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка, предшествовавшая моменту разрушения образца или появления в нем трещины, Н;  $S$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>.

Микротвердость по Викерсу измеряли на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 300 г по ГОСТ 9450-76. Измерение проводилось на пяти разных участках.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке представлены изображения структур пористых материалов на основе базальтового волокна после спекания при различных температурах, из которых следует, что материал состоит из волокон базальта, организующих высокопористую структуру. Образование пор между волокнами базальта происходит путем выгорания органической и полимерной связей.



*a* – при 1050 °С; *б* – при 1100 °С; *в* – при 1150 °С

**Рисунок. – Изображение структуры пористого материала на основе базальтового волокна после спекания**

По сравнению с материалом, спеченным при 1050 °С (см. рисунок, *a*), увеличение температуры спекания до 1100 °С (см. рисунок, *б*) не приводит к значимому изменению структуры. Дальнейшее повышение температуры спекания до 1150 °С сопровождается сплавлением базальтовых волокон (см. рисунок, *в*). Как показано ранее в работе [2], спекание при 1050 °С и 1100 °С приводит к формированию на поверхности базальтового волокна структуры, близкой к дисперсно-упрочненной, благодаря образованию мелкодисперсных минералов. Фазовый состав пористого материала из базальтового волокна, спеченного при температуре 1050 °С, приведен в таблице 1.

Известно, что основными минералогическими составляющими базальта являются алюмосиликаты – минералы, относящиеся к группам пироксенов и плагиоклазов, представляющие собой твердые растворы пере-

менного состава. Оксиды железа входят преимущественно в состав магнетита, андрадита и других минералов. Рядом авторов установлено, что при нагреве базальтового волокна выше 1000 °С наблюдается разрушение цепочечных силикатных структур, сопровождающееся образованием низкомолекулярной железосодержащей фазы: гематита [ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ], и каркасного силиката изоморфного ряда.

Таблица 1. – Фазовый состав пористого материала из базальтового волокна после термообработки 1050 °С

Кристаллическая фаза (формула), масс. %			
Анортит ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	Андрадит ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{Si}_3\text{O}_{12})$ )	Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	Калий-алюмосиликатный шпинелид ( $\text{K}_{0.85}\text{Al}_{0.85}\text{Si}_{0.15}\text{O}_2$ )
65	9	14	11

В таблице 2 представлены значения прочности на сжатие и усредненные значения микротвердости образцов исследуемых пористых материалов.

Таблица 2. – Механические свойства пористых материалов из базальтового волокна

№ п/п	Температура спекания, °С	Максимальная нагрузка, Н	Прочность на сжатие, МПа	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>
1	1050	1440	7,70	576,6
2	1000	1660	8,0	741,1
3	1150	2100	12,8	1011,8

Как следует из представленных результатов, наиболее прочным оказался материал, спеченный при 1150 °С: максимальная нагрузка составила 2100 Н, прочность на сжатие соответственно – 12,8 МПа. Наименьшей прочностью обладал образец, спеченный при 1050 °С: начало разрушения зафиксировано при нагрузке 1440 Н. При этом с ростом температуры спекания наблюдается значительное увеличение микротвердости исследуемых материалов (см. таблицу 2).

В таблице 3 представлены сравнительные характеристики пористых материалов из базальтового волокна и композиции «алюмосиликатный порошок – базальтовое волокно», результаты исследований характеристик которых представлены в работе [3].

Таблица 3. – Сравнительные характеристики пористых материалов

Характеристики	Материал	
	Базальтовое волокно	Алюмосиликат– базальтовое волокно
Пористость, %	52–75	37–48
Максимальный размер пор, мкм	13–29	65–86
Средний размер пор, мкм	8–18	27–30
Коэффициент проницаемости $\times 10^{-12}$ , м <sup>2</sup> *	42–55	29–47
Прочность на сжатие, МПа	7–13	21–27

Примечание: \*по воздуху.

Согласно таблице 3, использование базальтового волокна позволяет сформировать структуру материала, характеризующуюся в 1,4–1,6 раза большей пористостью, 1,2–1,4 раза большим коэффициентом проницаемости по воздуху, но в 1,6–3,4 раза меньшим размером пор по сравнению с материалом из композиции «алюмосиликат – базальтовое волокно». Поэтому можно предположить, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по отношению к аналогам.

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что спекание базальтового волокна при 1050 °С и 1100 °С формирует материал со структурой, характеризующейся пористостью 52–75%, средним размером пор 8–18 мкм, коэффициентом проницаемости (42–55)  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>, прочностью на сжатие 7–13 МПа. Полученные результаты доказывают, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по отношению к аналогам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петюшик Е.Е., Реут О.П., Якубовский А.Ч. Основы деформирования проволочных тел намотки. – Минск: Технопринт, 2003. – 218 с.
2. Влияние режимов спекания на структуру и физико-механические свойства пористых композиционных материалов на основе базальтовых волокон / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2021. – Вып. 44. – С. 134–139.
3. Структура и свойства пористых композиционных материалов на основе порошков алюмосиликатов и базальтового волокна / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2021. – Вып. 41. – С. 147–153.

## REFERENCES

1. Petyushik, E.E., Reut, O.P. & Yakubovskii, A.Ch. (2003). *Osnovy deformirovaniya provolochnykh tel namotki*. Minsk: Tekhnoprint. (In Russ.)
2. Petyushik, E.E., Azarov, S.M., Drobysh, A.A., Fomikhina, I.V. Markova, L.V. & Gamzeleva, T.V. (2021). Vliyanie rezhimov spekaniya na strukturu i fiziko-mekhanicheskie svoistva poristykh kompozitsionnykh materialov na osnove bazal'tovykh volokon [The influence of sintering modes on the structure and physical and mechanical properties of porous composite materials based on basalt fibers]. *Poroshkovaya metallurgiya [Powder metallurgy]*, (44), 134–139. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Petyushik, E.E., Azarov, S.M., Drobysh, A.A., Fomikhina, I.V. Markova, L.V. & Gamzeleva, T.V. (2021). Struktura i svoistva poristykh kompozitsionnykh materialov na osnove poroshkov alyumosilikatov i bazal'tovogo volokna [Structure and properties of porous composite materials based on aluminosilicate powders and basalt fiber]. *Poroshkovaya metallurgiya [Powder metallurgy]*, (41), 147–153. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 05.01.2024

**INFLUENCE OF FORMATION MODES ON CHARACTERISTICS  
OF POROUS MATERIALS FROM BASALT FIBERS**

**S. AZARAU<sup>2</sup>, Y. PIATSIUSHYK<sup>1</sup>, I. FOMIHINA<sup>1</sup>, A. DROBUSH<sup>2</sup>,  
T. EVTUCHOVA<sup>2</sup>, E. MICHASIK<sup>2</sup>, O. STEPANOVA<sup>2</sup>, I. SACSONOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>(State Research and Production Association of Powder Metallurgy, Minsk)

<sup>2</sup>(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The article presents the results of studying the characteristics of porous materials based on basalt fiber obtained by radial pressing followed by sintering in air. Based on the analysis of images of structures, it is shown that the material is characterized by high porosity. The formation of pores between basalt fibers occurs by burning out the organic and polymer bonds. It has been established that sintering of basalt fiber at 1050 °C and 1100 °C forms a porous material with a structure characterized by a porosity of 52–75%, an average pore size of 8–18 μm, a permeability coefficient of (42–55) 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>, and a strength of compression 7–13 MPa. The results obtained prove that the porous material made of basalt fiber is able to provide better filtering characteristics compared to analogues.*

**Keywords:** basalt, fiber, material properties, structure, phase composition.

УДК 504.064.45

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-122-127

## ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С НАЛИЧИЕМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И МАЗУТА

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф. В.П. ЛЯЛЯКИН<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук В.А. ДРОНЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

<sup>2</sup>(Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва)

Проведен анализ отработанных нефтесодержащих продуктов, образующихся на предприятиях, связанных с ремонтом и сервисным обслуживанием машин и оборудования, показавший присутствие большого количества отходов, содержащих дизельное топливо и мазут. Указано на негативное влияние на качество поверхности строительных конструкций и изделий при использовании в процессе изготовления в качестве антиадгезионного покрытия эмульсии, при приготовлении которой использовали нефтесодержащие отходы с наличием дизельного топлива и мазута. Экспериментально определено влияние дизельного топлива и мазута на стабильность эмульсии, приготовленной с использованием нефтесодержащих отходов предприятий по ремонту и сервисному обслуживанию машин и оборудования. Предложены технологические решения, позволяющие повысить до требуемого уровня качество поверхности железобетонных изделий при использовании в качестве антиадгезионного покрытия эмульсии на основе нефтесодержащих отходов с наличием дизельного топлива и мазута.

**Ключевые слова:** геоэкология, охрана окружающей среды, переработка отходов, утилизация отходов, нефтесодержащие отходы, охрана труда, приготовление эмульсий, антиадгезионные покрытия.

**Введение.** По данным [1] загрязнение вод нефтесодержащими отходами (НСО) составляет более 30% общего техногенного загрязнения. Данные отходы подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению.

На предприятиях агропромышленного сектора по ремонту и сервисному обслуживанию машин и оборудования в течение года образуется до 20 тыс. т нефтесодержащих сточных вод (НСВ). Их основными источниками служат участки по разборке и очистке машин и агрегатов, обкаточно-испытательные, обработке металлических заготовок резанием и др. В НСВ содержатся различные масла, смазочно-охлаждающие технологические средства, технические моющие средства (ТМС), пластичные смазки, дизельное топливо и др. Эти вещества, с одной стороны, могут угрожать окружающей среде и человеку, с другой – стать сырьем для производства импортозамещающей продукции.

Наибольшее количество НСВ выделяют участки по разборке и очистке машин и двигателей внутреннего сгорания [2]. Эти отходы образуются в процессе эксплуатации машин и силового оборудования, являются сложными многокомпонентными системами и включают до 95% об. моторные и трансмиссионные масла, пластичные смазки, дизельное топливо и мазут.

Анализ мировых тенденций развития оборудования и процессов для утилизации НСО показал [2; 3], что их совершенствование должно основываться не на энергозатратном и экологически опасном уничтожении, а на принципиально новых способах переработки, позволяющих получить на основе НСО товарные продукты различного назначения.

В Полоцком государственном университете имени Евфросинии Полоцкой проведены исследования, позволившие разработать установку и технологию приготовления мелкодисперсной водомасляной эмульсии с требуемой стабильностью на основе НСВ [2; 4–8]. В технологии заложен ударно-волновой способ эмульгирования, который дает возможность проводить обработку перемешиваемых компонентов с помощью низкочастотных ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя [2; 8].

Полученная эмульсия может:

– успешно заменить товарный эмульсол, применяемый для смазки форм при производстве железобетонных изделий. Она практически не оставляет жирных пятен на изделиях и обладает стабильностью в течение 25–30 дней. Его себестоимость в 5–10 раз ниже, чем себестоимость товарного эмульсола [2; 5];

– использоваться в качестве добавки к основному топливу котельных. При этом, как показали проведенные исследования [2; 4], происходит снижение содержания оксидов азота в дымовых газах на 37–40% с уменьшением расхода первичного топлива на 3–5%.

**Основная часть.** С экономической точки зрения наиболее выгодным является использование эмульсии, для приготовления которой использовали НСВ в качестве материала антиадгезионных покрытий рабочих поверхностей форм при производстве строительных конструкций и изделий. Однако при испытаниях эмульсии было установлено, что при наличии значительного количества дизельного топлива и мазута в исходной композиции, используемой в качестве основы для приготовления эмульсии, на бетонной поверхности формируемых изделий оставались темные жирные пятна, что негативно влияло не только на их товарный вид, но и на качество самой поверхности использу-

емых форм. Кроме того, замечено, что наличие дизельного топлива и мазута в эмульсии отрицательно сказывается на ее стабильности. Это, в свою очередь, может отрицательно сказаться на возможности использования эмульсии, приготовленной на основе НСВ, в качестве товарного продукта из-за ее недостаточной стабильности.

С целью исключения возможности появления названных дефектов проведены опыты по определению влияния дизельного топлива и мазута в исходном материале на стабильность эмульсии. Для испытаний использовались НСВ с разным процентным содержанием дизельного топлива и мазута (0, 10, 20%). Вода добавлялась в количестве 20, 30 и 40% от объема эмульсии. Для различного содержания воды в эмульсии и состава фракций составлены уравнения регрессии.

Содержание воды в эмульсии 20% (рисунок 1):

- без дизельного топлива и мазута

$$y = -0,0056t^2 + 0,3488t - 0,0824; \quad (1)$$

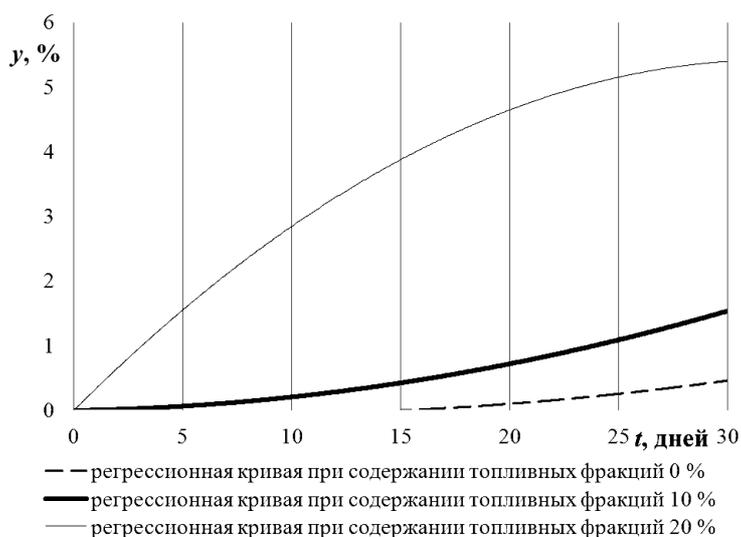
- при содержании дизельного топлива и мазута 10% от объема НСО

$$y = 0,0013t^2 + 0,0149t - 0,0665; \quad (2)$$

- при содержании дизельного топлива и мазута 20% от объема НСО

$$y = 0,0013t^2 - 0,0243t + 0,0625. \quad (3)$$

Из рисунка 1 следует, что при содержании воды в эмульсии 20% требуемой стабильности удовлетворяют эмульсии: 1) без дизельного топлива и мазута (объем выделившейся воды за 30 сут составляет 0,5%); 2) с содержанием дизельного топлива и мазута 10% (объем выделившейся воды за 30 сут хранения эмульсии составляет 1,5%).



**Рисунок 1.** – Зависимость выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании воды в эмульсии 20% (содержание дизельного топлива и мазута от 0 до 20%, с шагом 10%)

Содержание воды в эмульсии 30% (рисунок 2):

- без наличия дизельного топлива и мазута

$$y = -0,0065t^2 + 0,5105t + 0,5095; \quad (4)$$

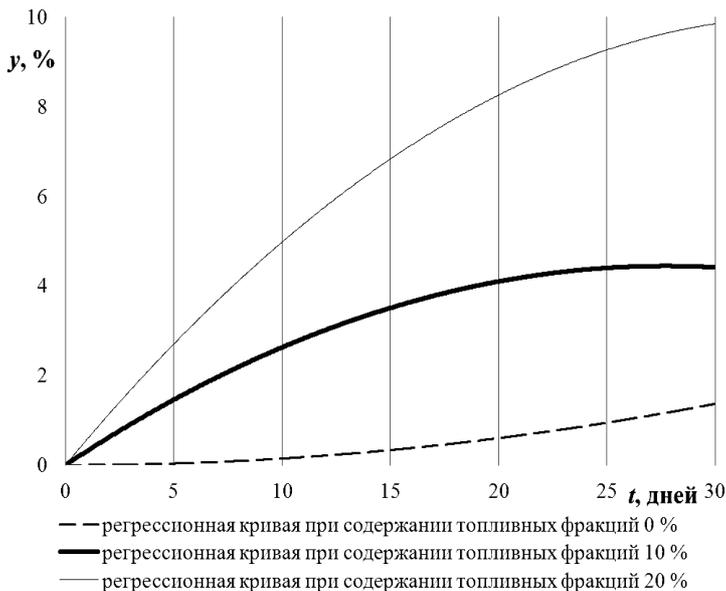
- при содержании дизельного топлива и мазута 10% от объема НСВ

$$y = -0,0075t^2 + 0,3538t + 0,001; \quad (5)$$

- при содержании дизельного топлива и мазута 20% от объема НСО

$$y = 0,0017t^2 - 0,006t + 0,0355. \quad (6)$$

При содержании воды в эмульсии 30% (рисунок 2) требуемую стабильность обеспечивает состав эмульсии без дизельного топлива и мазута. При содержании дизельного топлива и мазута 10% объем выделившейся воды за 30 сут хранения составляет 4,0%.



**Рисунок 2. – Зависимость выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании воды в эмульсии 30% (содержание топливных фракций и мазута от 0 до 20 %, с шагом 10 %)**

Содержание воды в эмульсии 40% (рисунок 3):

- без наличия дизельного топлива и мазута

$$y = -0,0069t^2 + 0,6197t - 1,2318; \tag{7}$$

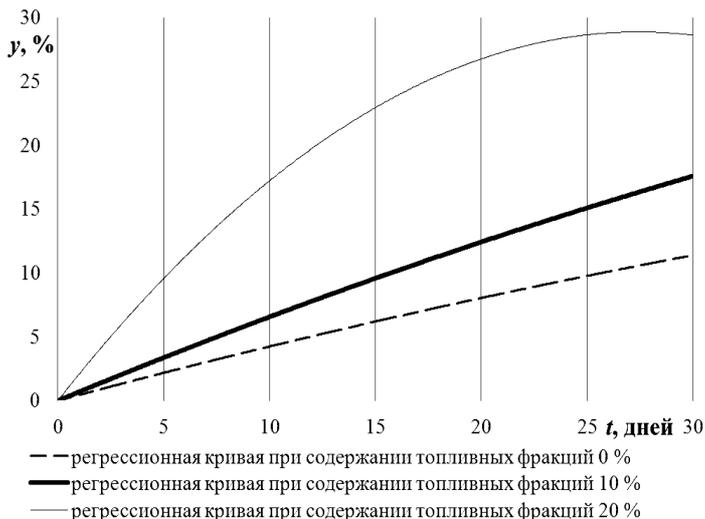
- при содержании дизельного топлива и мазута 10% от объема НСВ

$$y = -0,008t^2 + 0,859t - 1,1929; \tag{8}$$

- при содержании дизельного топлива и мазута 20% от объема НСВ

$$y = -0,0435t^2 + 2,1022t + 2,2127. \tag{9}$$

При содержании воды в эмульсии 40% (рисунок 3) из эмульсии без дизельного топлива и мазута выделяется 2% воды за 7 сут ее хранения. Такое же количество воды выделяется из эмульсии с содержанием дизельного топлива и мазута 10% за 3 сут.



**Рисунок 3. – Зависимость выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании воды в эмульсии 40% (содержание топливных фракций и мазута от 0 до 20 %, с шагом 10 %)**

При содержании в эмульсии дизельного топлива и мазута 20% эмульсия не имеет требуемой стабильности. Наиболее близкий результат к требуемой стабильности получается при содержании дизельного топлива и мазута в эмульсии, близком к 10%.

Время хранения эмульсии с выделением нормативного количества воды можно вычислить, используя уравнения регрессии (1)–(9). С целью более точного определения максимально возможного содержания дизельного топлива и мазута в эмульсии (от массы НСВ), при котором объем выделившейся воды из эмульсии воды не превышает допустимых значений, необходимо проводить экспериментальные исследования с содержанием дизельного топлива и мазута 1–10% с шагом 1–2%.

Одним из веществ, способствующих сохранению однородного состава эмульсии и препятствующих выделению дизельного топлива и мазута из эмульсии, является негашеная известь [2]. Ее использование позволяет исключить появление на бетонной поверхности темных жирных пятен, которые портят товарный вид изделия и усложняют его дальнейшую обработку. Для определения оптимального количества негашеной извести в эмульсии, обеспечивающего качество железобетонных конструкций, полученных в формах, покрытых приготовленной эмульсией, проведены экспериментальные исследования.

Во всех дальнейших экспериментах содержание воды в эмульсии составляло 30%. В предыдущих экспериментальных исследованиях [2] получаемая эмульсия была более стабильной при использовании ТМС Лабомид 101, чем при использовании ТМС МС-32, поэтому в дальнейших экспериментах по приготовлению различных эмульсий будем использовать только ТМС Лабомид 101. Кроме данного ТМС, в воду добавляли негашеную известь от 0 до 4% (от объема воды) с шагом 0,5%. Эмульсия приготавливалась с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем, в течение 15 мин. Далее в течение 30 сут проводилось наблюдение за состоянием эмульсии с целью выявления границы между фракциями. Для каждого состава также измерялось выпадение воды в течение 30 сут.

Результаты экспериментов при содержании извести от 0,5 до 2,0%, обеспечивающем требуемую стабильность эмульсии, представлены на рисунках 4–7. (Результаты экспериментов при содержании извести от 2,5% до 4,0% не приведены, т.к. при таком ее содержании получается нестабильная эмульсия).

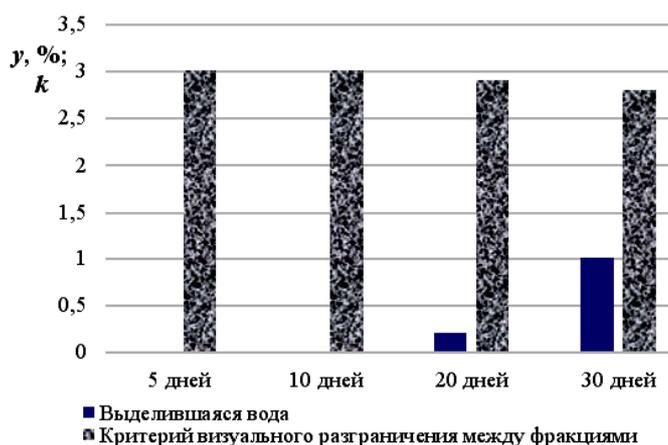


Рисунок 4. – Зависимость критерия визуального разграничения между фракциями  $k$  и выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании 3,0% Лабомиды 101 и негашеной извести 0,5% от массы воды

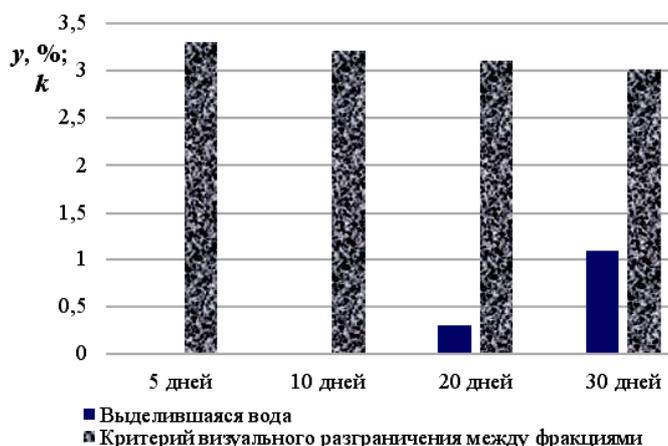


Рисунок 5. – Зависимость критерия визуального разграничения между фракциями  $k$  и выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании 3,0% Лабомиды 101 и негашеной извести 1,0% от массы воды

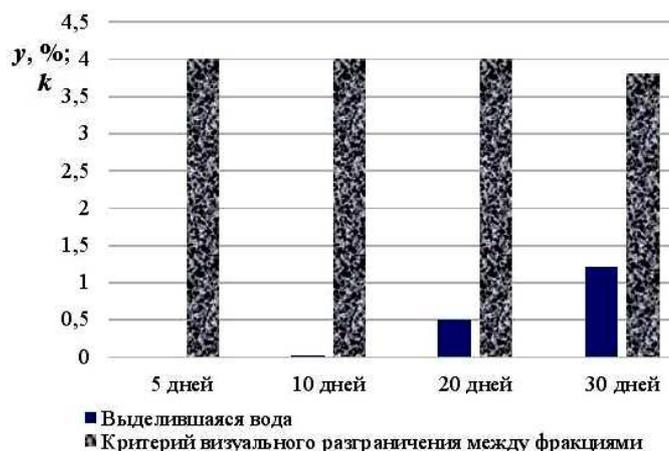


Рисунок 6. – Зависимость критерия визуального разграничения между фракциями  $k$  и выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании 3,0% Лабомида 101 и негашеной извести 1,5% от массы воды

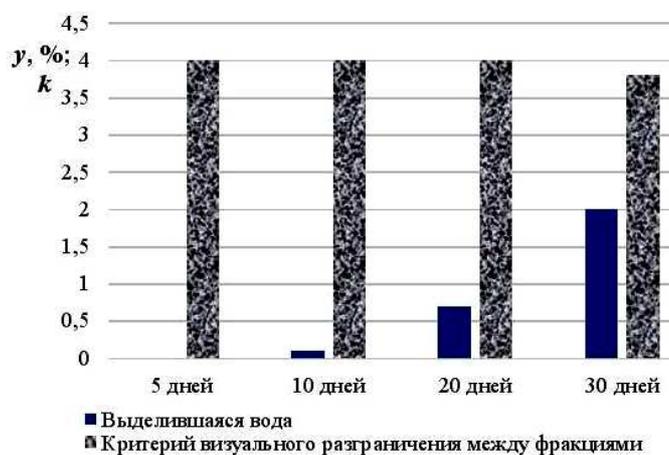


Рисунок 7. – Зависимость критерия визуального разграничения между фракциями  $k$  и выделившейся воды  $y$  от времени  $t$  при содержании 3,0% Лабомида 101 и негашеной извести 2,0% от массы воды

Наличие в эмульсии извести способствует размыванию границы между фракциями. При добавлении извести получается эмульсия, в которой дизельное топливо и мазут (при их наличии в составе НСВ) распределяются более равномерно.

Использование такой эмульсии в качестве антиадгезионного покрытия при изготовлении железобетонных конструкций обеспечивает поверхность без темных жирных пятен, способствуя тем самым повышению конкурентоспособности предлагаемой эмульсии в качестве антиадгезионного покрытия.

Установлено, что повышение содержания извести в эмульсии негативно сказывается на ее стабильности. Так, при количестве извести 2% стабильность эмульсии достигает предельно допустимых значений, а в отдельных случаях превышает их.

**Заключение.** По итогам анализа полученных результатов экспериментов сделан вывод:

– если в НСВ присутствуют дизельное топливо и мазут, то при приготовлении эмульсии для использования в качестве антиадгезионного покрытия для форм при изготовлении бетонных и железобетонных изделий рекомендуется добавлять негашеную известь в количестве 1,5%;

– при приготовлении эмульсии (эмульсия с высоким содержанием дизельного топлива и мазута в НСВ, используемых в качестве ее основы), которая будет использоваться как добавка к основному топливу паровых котлов, негашеную известь добавлять не следует.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы общей экологии и международной экологической политики: учеб. пособие для вузов / Р.А. Алиев, А.А. Авраменко, Е.Д. Базилева и др. – М.: Аспект Пресс, 2014. – 382 с.
2. Иванов В.П., Дронченко В.А. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов. – Новополоцк: ПГУ, 2016. – 248 с.

3. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина и др. – М.: Нефть и газ, 2000. – 424 с.
4. Утилизация нефтесодержащих сточных вод эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко, Т.В. Вигерина и др. // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 1. – С. 27–33.
5. Дронченко В.А. Использование отходов ремонтного производства в качестве технологических материалов. Тр. ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 126. – С. 117–120.
6. Дронченко В.А. Получение мелкодисперсной эмульсии на основе нефтесодержащих отходов и ее утилизация // Вестн. БрГТУ. Машиностроение. – 2017. – № 4(106). – С. 51–54.
7. Иванов В.П., Дронченко В.А. Защита окружающей среды от отработавших водных растворов технических моющих средств // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Приклад. науки. – 2016. – № 8. – С. 160–165.
8. Дронченко В.А. Влияние амплитуды пульсаций скорости потока на дисперсность эмульсии на основе нефтесодержащих отходов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Приклад. науки. – 2018. – № 16. – С. 151–156.

## REFERENCES

1. Aliev, R.A., Avramenko, A.A., Bazileva, E.D., Bliznetskaya, E.A., Nikiforov, A.I. & Ryazanova N.E. (2014). *Osnovy obshchei ekologii i mezhdunarodnoi ekologicheskoi politiki*. Moscow: Aspekt Press. (In Russ.)
2. Ivanov, V.P. & Dronchenko, V.A. (2016). *Okhrana truda rabochikh i zashchita okruzhayushchei sredy ot vrednogo vliyaniya neftesoderzhashchikh otkhodov*. – Novopolotsk: PGU.
3. Evdokimov, A.Yu., Fuks, I.G., Shabalina, T.N. & Bagdasarov, L.N. (2000). *Smazochnye materialy i problemy ekologii*. Moscow: Neft' i gaz. (In Russ.)
4. Ivanov, V.P., Dronchenko, V.A., Vigerina, T.V. & Pilipenko, S.V. (2020). Utilizatsiya neftesoderzhashchikh stochnykh vod emul'girovaniem i szhiganiem [Recycling of oil-containing wastewater by emulsification and combustion]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources]*, 331(1), 27–33. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Dronchenko, V.A. (2017). Ispol'zovanie otkhodov remontnogo proizvodstva v kachestve tekhnologicheskikh materialov [Justification of technical solutions in the preparation repair production]. *Trudy GOSNITI [Proceedings of GOSNITI]*, (126), 117–120. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Dronchenko, V.A. (2017). Poluchenie melkodispersnoi emul'sii na osnove neftesoderzhashchikh otkhodov i ee utilizatsiya [Preparation of fine emulsion based on oil-containing waste and its disposal]. *Vestnik BrGTU. Mashinostroenie [Bulletin of BrSTU. Mechanical engineering]*, 4(106), 51–54. (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Ivanov, V.P. & Dronchenko, V.A. (2016). Zashchita okruzhayushchei sredy ot otrabotavshikh vodnykh rastvorov tekhnicheskikh moyushchikh sredstv [Protection of the environment from the exhaust of aqueous solutions of technical detergents]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science]*, (8), 160–165. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Dronchenko, V.A. (2018). Vliyanie amplitudy pul'satsii skorosti potoka na dispersnost' emul'sii na osnove neftesoderzhashchikh otkhodov [Analysis of factors influencing the dispersity of the emulsion on oily waste]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science]*, (16), 151–156. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 08.02.2024

**PROTECTION OF THE ENVIRONMENT FROM OILY WASTE  
CONTAINING DIESEL FUEL AND FUEL OIL**

V. IVANOV<sup>1</sup>, V. LYALYAKIN<sup>2</sup>,  
V. DRONCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

<sup>2</sup>(*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow*)

*The analysis of spent oil-containing products formed at enterprises associated with the repair and maintenance of machinery and equipment was carried out, which showed the presence of a large amount of waste containing diesel fuel and fuel oil. It is indicated that the negative effect on the surface quality of building structures and products when used in the manufacturing process as an anti-adhesive coating, an emulsion in the preparation of which oil-containing waste containing diesel fuel and fuel oil was used. The effect of diesel fuel and fuel oil on the stability of an emulsion prepared using oily waste from enterprises for the repair and maintenance of machinery and equipment has been experimentally determined. Technological solutions have been proposed to increase the surface quality of reinforced concrete products to the required level when using an emulsion based on oily waste with the presence of diesel fuel and fuel oil as an anti-adhesive coating.*

**Keywords:** *geoecology, environmental protection, waste recycling, waste disposal, oily waste, occupational safety, preparation of emulsions, anti-adhesive coatings.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Попок Н.Н., Беляков Н.В.</i> Система автоматизированного выбора средств измерения геометрических величин для технологической подготовки аддитивного и субтрактивного машиностроительных производств деталей сложной формы .....	2
<i>Ермилов С.В., Жилевич М.И., Капский Д.В.</i> Динамика тормозного привода с антиблокировочной системой автомобиля особо большой грузоподъемности .....	11
<i>Веремей Г.А.</i> Методика исследования параметров точности в процессе восстановления седел клапанов.....	18
<i>Попок Н.Н., Анисимов В.С.</i> Динамика механической обработки концевыми фрезами на станке с ЧПУ .....	28
<i>Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Портянко С.А.</i> Управление тепловыми и охлаждающими потоками при скоростной обработке неполных сферических поверхностей деталей машин .....	35
<i>Патапу У.А., Русан С.И., Сивачэнка Л.А.</i> Даследаванне становішча раўнавагі механізмаў рабочей камеры ланцужнага аграгата .....	45
<i>Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Трусов И.В.</i> Снижение кинематической погрешности эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов в результате применения двухпоточной схемы нагружения .....	54

### ТРАНСПОРТ

<i>Иванов В.П., Вигерина Т.В.</i> Ресурсосберегающая обкатка двигателей внутреннего сгорания при использовании модифицирующих присадок к маслу .....	61
<i>Лобашов А.О., Капский Д.В., Семченков С.С.</i> Закономерности изменения скорости транспортных потоков в городах .....	67
<i>Рынкевич С.А.</i> Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин ....	71
<i>Гурский А.С.</i> Совершенствование дистанционной диагностики ячеек высоковольтной аккумуляторной батареи .....	79
<i>Швецова Е.В.</i> Информационно-транспортные системы в контексте городских перевозок .....	89

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Сафронова Е.В., Спиридонов А.В., Молоток Е.В., Трус В.А.</i> Компьютерное моделирование и оптимизация процессов теплообмена в программе Ansys на примере теплообменного аппарата установки АВТ-2 ОАО «Нафтан» .....	95
<i>Булавка Ю.А., Кожмятов К.Ю.</i> Совершенствование алгоритма проведения неразрушающего контроля оборудования, работающего под избыточным давлением .....	101
<i>Аннаев Г., Ермак А.А., Советников Н.А., Маммедов Б.М.</i> Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок .....	107
<i>Юхно Д.С., Ермак А.А.</i> Изучение свойств сорбента, полученного путем активации нефтяного кокса фосфогипсом .....	112
<i>Азаров С.М., Петюшик Е.Е., Фомихина И.В., Дробыш А.А., Евтухова Т.Е., Михасик Е.И., Степанова О.М., Саксонов И.В.</i> Влияние режимов формирования на характеристики пористых материалов из базальтовых волокон.....	118
<i>Иванов В.П., Лялякин В.П., Дронченко В.А.</i> Защита окружающей среды от нефтесодержащих отходов с наличием дизельного топлива и мазута .....	122